



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Diseño de la rápida en la progresiva 1+675-1+725 para el
proyecto: revestimiento del Canal Julquillas-Pacar
distrito de Pativilca, provincia de Barranca, región Lima**

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Carlos Alberto RODRIGUEZ GUEVARA

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Rodriguez, C. (2018). *Diseño de la rápida en la progresiva 1+675-1+725 para el proyecto: revestimiento del Canal Julquillas-Pacar distrito de Pativilca, provincia de Barranca, región Lima*. [Monografía Técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS POR LA MODALIDAD M3, SUFICIENCIA PROFESIONAL

Siendo las 17:00 horas del día jueves 26 de julio de 2018 en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Ing. MANUEL VICENTE HERQUINIO ARIAS y con la asistencia del Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA y del Ing. WILLIAM WILFREDO CHAUCA NOLASCO, miembros del Jurado Examinador de Monografía Técnica, de conformidad con la Resolución Rectoral N° 01934-R-02 que aprueba las diferentes modalidades de titulación profesional, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Monografía Técnica en la que el Bachiller CARLOS ALBERTO RODRIGUEZ GUEVARA puso a consideración del Jurado Examinador su trabajo de Monografía Técnica como parte de los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos por la Modalidad M3, Suficiencia Profesional.

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente e invitó al Bachiller CARLOS ALBERTO RODRIGUEZ GUEVARA, a realizar la exposición de su trabajo titulado "DISEÑO DE LA RÁPIDA EN LA PROGRESIVA 1+675-1+725 PARA EL PROYECTO: REVESTIMIENTO DEL CANAL JULQUILLAS - PACAR DISTRITO DE PATIVILCA, PROVINCIA DE BARRANCA, REGIÓN LIMA" durante un tiempo de 30 minutos.

Concluida la exposición del candidato, y luego de las preguntas de rigor de parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación correspondiente. Se procedió a promediar la nota final obtenida en los cursos del Ciclo de Actualización Profesional (CAP), y el resultado se promedió a su vez con la nota de sustentación de la monografía para hallar el promedio final.

Al término de la deliberación del jurado, se invitó al candidato a regresar a la sala de sesión para dar lectura a la calificación final obtenida, la misma que fue:

..... Dieciseis 16

El Presidente del Jurado Examinador, Ing. MANUEL VICENTE HERQUINIO ARIAS, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller CARLOS ALBERTO RODRIGUEZ GUEVARA Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 18:15 horas del mismo día, se levantó la sesión.

Ing. MANUEL VICENTE HERQUINIO ARIAS
Presidente de Jurado Examinador

Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
Miembro de Jurado Examinador

Ing. WILLIAM WILFREDO CHAUCA NOLASCO
Miembro de Jurado Examinador

Resumen

Dentro del proyecto “Revestimiento del Canal Julquillas-Pacar” se está considerando la construcción de una rápida hidráulica para salvar un desnivel que presenta el canal. El desarrollo de la monografía tiene como objetivo proponer el correcto y eficiente diseño de una rápida hidráulica que estará ubicada en la progresiva 1+675 – 1+725 del canal Julquillas-Pacar (prolongación del canal Huayto), con una longitud de 50m y un desnivel de 3.48m se considera para su diseño un caudal de $2.25\text{m}^3/\text{s}$ (cabe señalar que el canal Julquillas-Pacar tiene una conducción hidráulica que varía de $3.25\text{m}^3/\text{s}$ a $1.50\text{m}^3/\text{s}$ en sus progresivas). Otro aspecto que se consideró al realizar la monografía es contar con una fuente de información que sirva de guía para diseñar eficientemente dicha estructura hidráulica. Para las condiciones iniciales se ha tenido en cuenta recomendaciones dadas por la U.S.B.R. y datos obtenidos por los diferentes estudios de campo que se realizaron (Topografía, Hidrología, etc). Para el diseño de la estructura hidráulica se está considerando que las transiciones mantengan un flujo subcrítico, el tramo inclinado presentara un flujo supercrítico por lo que el dissipador de energía contará con bloques de impacto, dados dissipadores y umbral de salida que ayuden a contener el resalto hidráulico y evitar problemas de erosión en la estructura.

Palabras clave: estructura hidráulica, canal, caudal, resalto hidráulico, Julquillas-Pacar

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Problemática y problema a solucionar	2
1.3. Objetivos de la monografía	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Limitaciones del tema	2
1.5. Ubicación del Proyecto	3
1.6. Acceso	3
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1. Flujo en canales abiertos	5
2.1.1. Estados del flujo en canales abiertos	5
2.1.2. Energía del flujo en canales abiertos	7
2.1.3. Energía específica en canales abiertos	9
2.1.4. Régimen crítico en canales abiertos.....	10
2.2. Resalto hidráulico	11
2.2.1. Definición	11
2.2.2. Características del resalto hidráulico	14
2.3. Rápida	19
2.3.1. Transición de entrada.....	23
2.3.2. Sección de control.....	27
2.3.3. Tramo inclinado	29
2.3.4. Trayectoria	33
2.3.5. Disipador de energía (estanque, colchón o poza)	34
2.3.6. Transición de salida	51
2.3.7. Formación de Ondas	52
CAPITULO 3 – DESARROLLO DEL TEMA	54
3.1. Condiciones iniciales	54
3.2. Datos iniciales.....	55
3.3. Metodología de cálculo.....	56
3.3.1. Canal aguas arriba y canal aguas abajo.....	56
3.3.2. Transición de entrada.....	56
3.3.3. Sección de control.....	56
3.3.4. Tramo inclinado	56
3.3.5. Trayectoria	57
3.3.6. Disipador de energía	57
3.3.7. Transición de salida	57
3.4. Cálculos de ingeniería.....	58
3.4.1. Cálculo de altura del muro aguas arriba	58
3.4.2. Cálculo de longitud de la transición de entrada	60
3.4.3. Cálculo de la sección de control (vertedero de cresta delgada)	61
3.4.4. Cálculo para verificar la formación de ondas en la entrada.....	69

3.4.5. Cálculo de altura del muro del tramo inclinado.....	70
3.4.6. Cálculo de las coordenadas y elevaciones de la trayectoria parabólica.....	85
3.4.7. Cálculo de altura del muro del dissipador de energía.....	87
3.4.8. Cálculo de longitud del dissipador de energía.....	105
3.4.9. Cálculo de dimensiones de los elementos del dissipador de energía	106
3.4.10. Cálculo de longitud de la transición de salida	111
3.4.11. Cálculo de altura del muro aguas abajo	112
3.4.12. Cálculo para verificar la formación de ondas en la salida	113
CAPITULO 4 – RESULTADOS.....	115
4.1. Tablas de resultados	115
4.1.1. Transición de entrada.....	115
4.1.2. Tramo inclinado	116
4.1.3. Trayectoria	117
4.1.4. Dissipador de energía	118
4.1.5. Transición de salida	119
4.2. Discusión de resultados.....	120
CONCLUSIONES	121
RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFIA	124
ANEXOS	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Valores del coeficiente K para la ecuación de Sieñchin	14
Tabla 2.Tipos y características de resalto hidráulico según el número de Froude	17
Tabla 3.Valores de los coeficientes de pérdidas en las transiciones	26
Tabla 4.Condiciones y características de los disipadores de energía.....	50
Tabla 5.Características hidráulicas del canal aguas arriba y canal aguas abajo	55
Tabla 6.Borde libre para canales en función a su caudal	58
Tabla 7.Valores obtenidos por tramos finitos ($y = 0.10\text{m}$ hasta $y = 0.19\text{m}$)	74
Tabla 8.Valores obtenidos por tramos finitos ($y = 0.20\text{m}$ hasta $y = 0.29\text{m}$)	75
Tabla 9.Valores obtenidos por tramos finitos ($y = 0.30\text{m}$ hasta $y = 0.39\text{m}$)	76
Tabla 10.Valores obtenidos por tramos finitos ($y = 0.40\text{m}$ hasta $y = 0.49\text{m}$)	77
Tabla 11.Valores obtenidos por tramos finitos ($y = 0.50\text{m}$ hasta $y = 0.59\text{m}$)	78
Tabla 12.Valores obtenidos por tramos finitos ($y = 0.60\text{m}$ hasta $y = 0.691\text{m}$)	79
Tabla 13.Tirantes de escurrimiento en el tramo inclinado.....	82
Tabla 14.Valores de los tirantes hallados en el tramo inclinado.....	83
Tabla 15.Valores de las coordenadas (x,y) de la trayectoria	86
Tabla 16.Valores de elevación de la trayectoria (condición de llegada)	89
Tabla 17.Valores de elevación del disipador de energía (condición de salida)	92
Tabla 18.Parámetros de la transición de entrada	115
Tabla 19.Parámetros del tramo inclinado	116
Tabla 20.Parámetros de la trayectoria.....	117
Tabla 21.Parámetros del disipador de energía	118
Tabla 22.Parámetros de la transición de salida.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa distrital de Pativilca	4
Figura 2. Comportamiento del flujo en canales abiertos	6
Figura 3. Energía del flujo en un canal abierto	7
Figura 4. Curva de la energía específica	9
Figura 5. Resalto hidráulico en un canal abierto	11
Figura 6. Curva para hallar la longitud del resalto en función del número de Froude	16
Figura 7. Tipos de resalto hidráulico según el número de Froude	18
Figura 8. Vista de planta y perfil longitudinal de una rápida en canal abierto	22
Figura 9. Vista de planta de una transición lineal de entrada	23
Figura 10. Régimen crítico en la sección de control	27
Figura 11. Líneas de energía en el tramo inclinado	29
Figura 12. Colchón hidráulico como dissipador de energía	34
Figura 13. Resalto hidráulico cuando $h_{min} < h_1$	35
Figura 14. Colchón hidráulico con su solera profundizada	36
Figura 15. Colchón hidráulico con travesaño en el fondo	37
Figura 16. Elementos que conforman un estanque amortiguador	38
Figura 17. Curvas para hallar parámetros de un estanque amortiguador USBR Tipo I	40
Figura 18. Curva para la longitud del resalto en estanque amortiguador USBR Tipo II..	41
Figura 19. Estanque amortiguador USBR Tipo II y la curva para hallar sus parámetros..	42
Figura 20. Estanque amortiguador USBR Tipo III	43
Figura 21. Curvas para hallar parámetros de un estanque amortiguador USBR Tipo III..	44
Figura 22. Estanque amortiguador USBR Tipo IV	45
Figura 23. Curvas para hallar parámetros de un estanque amortiguador USBR Tipo IV .	46
Figura 24. Colchón hidráulico SAF	49
Figura 25. Vista de planta de una transición de salida	51
Figura 26. Parámetros de la transición de entrada	61
Figura 27. Cotas de la sección 1 (aguas arriba) y la sección 2 (sección de control)	67
Figura 28. Curvas de energía E y $E+h_f$ vs tirante.	81
Figura 29. Curva de la Trayectoria	87
Figura 30. Curva de elevación de la trayectoria vs tirante conjugado menor	90
Figura 31. Curva de elevación del fondo del dissipador vs tirante conjugado menor	93
Figura 32. Intersección de las curvas de elevación	94
Figura 33. Cota y niveles de energía originales del dissipador de energía	98
Figura 34. Cota y niveles de energía del dissipador considerando 40% de ahogamiento.	100
Figura 35. Borde libre para dissipadores de energía en rápidas	103
Figura 36. Dimensiones de los dientes deflectores	108
Figura 37. Dimensiones de los dados dissipadores	109
Figura 38. Dimensiones del umbral de salida	110
Figura 39. Parámetros de la transición de salida	111

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Introducción

La presente monografía trata el diseño de una rápida, el desarrollo se basa en la información obtenida del Proyecto “Revestimiento del Canal Julquillas-Pacar”.

La ubicación del Proyecto “Revestimiento del Canal Julquillas-Pacar” se encuentra en el distrito de Pativilca, provincia de Barranca, región de Lima.

El canal Julquillas-Pacar tiene una longitud total de 15.4 km y una conducción hidráulica que varía de $3.25\text{m}^3/\text{s}$ a $1.50\text{m}^3/\text{s}$.

El 60% del canal en su revestimiento se encuentra construido sobre terreno natural y el 40% está revestido con concreto, es de sección trapezoidal que se encuentra deteriorado y con capacidad de conducción reducida.

Con la finalidad de obtener un mejor aprovechamiento del recurso hídrico (eficiencia de conducción que permitirá mejorar las condiciones de riego) la Comisión de Regantes del Sub Sector de Riego Huayto, con el aporte de la Empresa Agroindustrial Paramonga, determinó realizar el Estudio del Proyecto “Revestimiento del Canal Julquillas-Pacar”.

En este proyecto se da la necesidad de una rápida para empalmar el tramo de la progresiva 1+675 – 1+725 del canal Julquillas-Pacar con desnivel de 3.48m.

El diseño que se propone es de una estructura hidráulica que no presente problemas de erosión.

1.2. Problemática y problema a solucionar

Actualmente debido a las deficiencias de la construcción rustica deteriorada y a que se encuentra sobre terreno natural el canal presenta problemas de filtración. Además, en época de avenida se desea optimizar la conducción del agua y evitar desbordamientos.

1.3. Objetivos de la monografía

1.3.1. Objetivo general

Diseñar la rápida que unirá el tramo 1+675 – 1+725 del canal Julquillas–Pacar.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Diseñar la transición de entrada.
- b. Diseñar la sección de control.
- c. Diseñar el tramo inclinado.
- d. Diseñar la trayectoria.
- e. Diseñar el dissipador de energía.
- f. Diseñar la transición de salida.

1.4. Limitaciones del tema

La monografía no está considerando en su desarrollo:

- a. La capacidad portante de los suelos (suelo donde se construirá la estructura).
- b. Parámetros estructurales (características y especificaciones del concreto).

1.5. Ubicación del Proyecto

Políticamente se encuentra localizado en:

Distrito : Pativilca

Provincia : Barranca

Región : Lima

Bajo la administración de:

Distrito de Riego : Barranca

Organización : Junta de Usuarios Valle Pativilca

Sector : Comisión de Regantes del Sub Sector de Riego Huayto

Geográficamente se encuentra ubicada entre las coordenadas inicial y final siguiente:

N = 8°825,702.25 E = 206,292.75

N = 8°823,278.75 E = 200,685.45

1.6. Acceso

Desde la ciudad de Lima el acceso es por la carretera Panamericana Norte, hasta llegar a la ciudad de Pativilca (aproximadamente 205 km), se ingresa hacia la derecha continuando por la carretera a Cajatambo hasta la localidad de Huayto (aproximadamente 20 km) y desde aquí por la red interna de la infraestructura de riego hasta la zona donde se inicial el lateral de riego Julquillas (aproximadamente 7 km), lugar donde se inicia la prolongación del canal matriz Huayto que se convertirá en un canal de orden 1 denominándose “Julquillas–Pacar”.

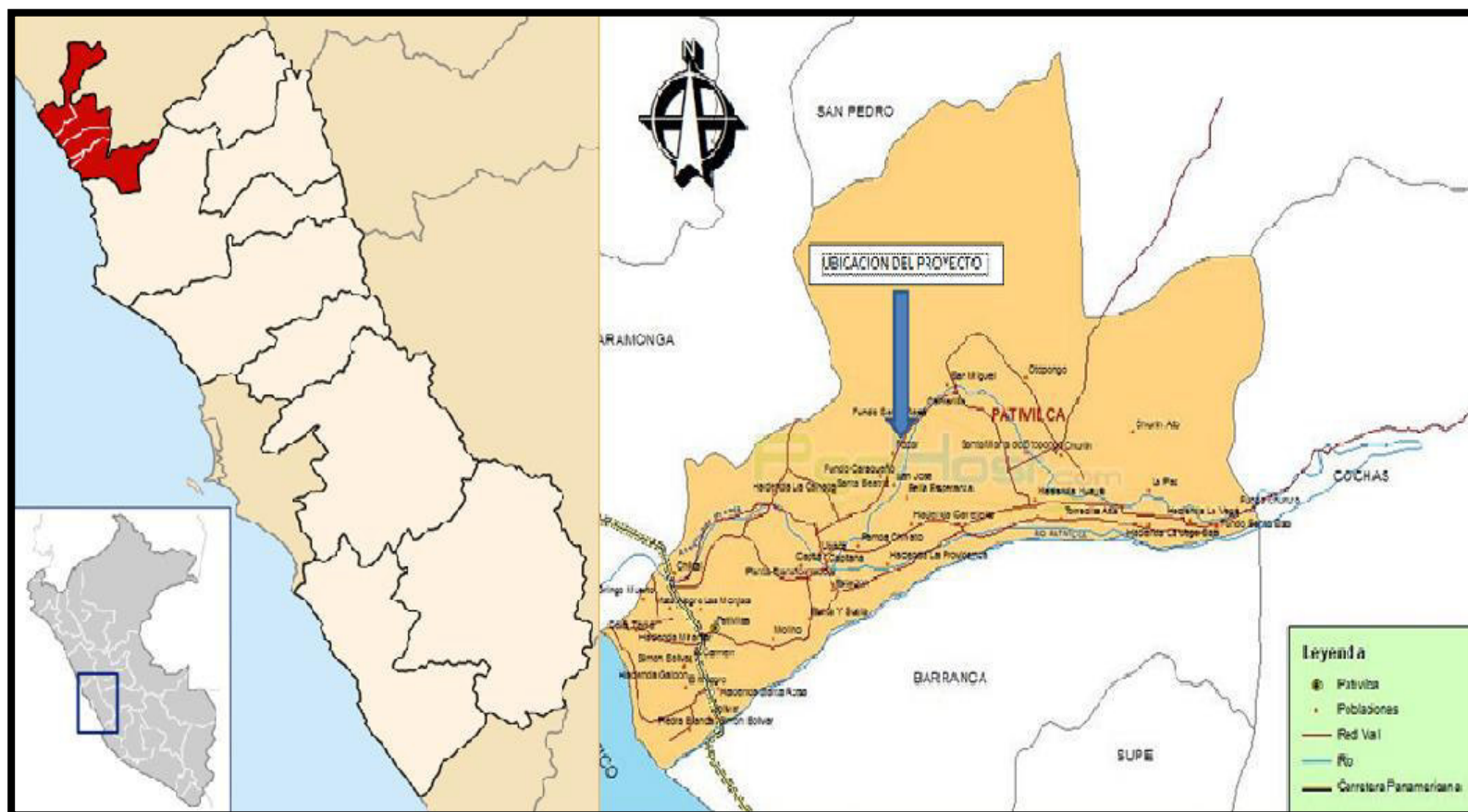


Figura 1. Mapa distrital de Pativilca
Fuente: Instituto Geográfico Nacional 2018.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Flujo en canales abiertos

2.1.1. Estados del flujo en canales abiertos

El estado o comportamiento de flujo en canales abiertos está gobernado básicamente por los efectos de la gravedad y la viscosidad en relación con las fuerzas inerciales del flujo. (Chow, 1994)

El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, esta relación está dada por el número de Froude. (Chow, 1994)

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (2.1)$$

Dónde:

Fr = número de Froude

V = velocidad media del flujo (m/s)

y = tirante o profundidad hidráulica (m)

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m²/s

$Fr = 1$: Velocidad del agua igual a la velocidad de la onda de perturbación. Flujo crítico. (Chow, 1994)

$Fr < 1$: Velocidad del agua menor a la velocidad de la onda de perturbación. Flujo subcrítico. El flujo tiene una velocidad baja (tranquilo y de corriente lenta). (Chow, 1994)

$Fr > 1$: Velocidad del agua mayor a la velocidad de la onda de perturbación. Flujo supercrítico. El flujo tiene alta velocidad (rápido, ultrarrápido y torrencial). (Chow, 1994)

La onda gravitacional puede prolongarse hacia aguas arriba en un canal con flujo subcrítico, pero no puede hacerlo en un canal con flujo supercrítico, debido a que la celeridad es mayor que la velocidad del flujo en el primer caso y menor en el segundo. (Chow, 1994)

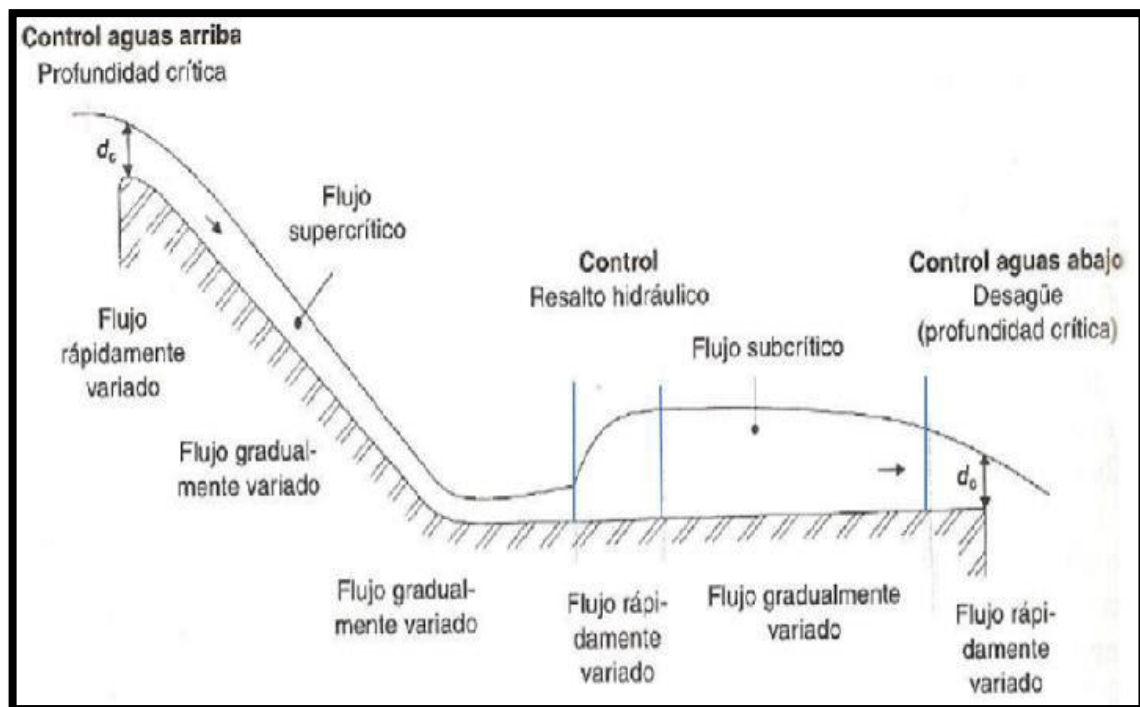


Figura 2. Comportamiento del flujo en canales abiertos
Fuente: Rodríguez, 2008.

2.1.2. Energía del flujo en canales abiertos

La energía total del agua de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección del canal puede expresarse como la altura total de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad. (Chow, 1994)

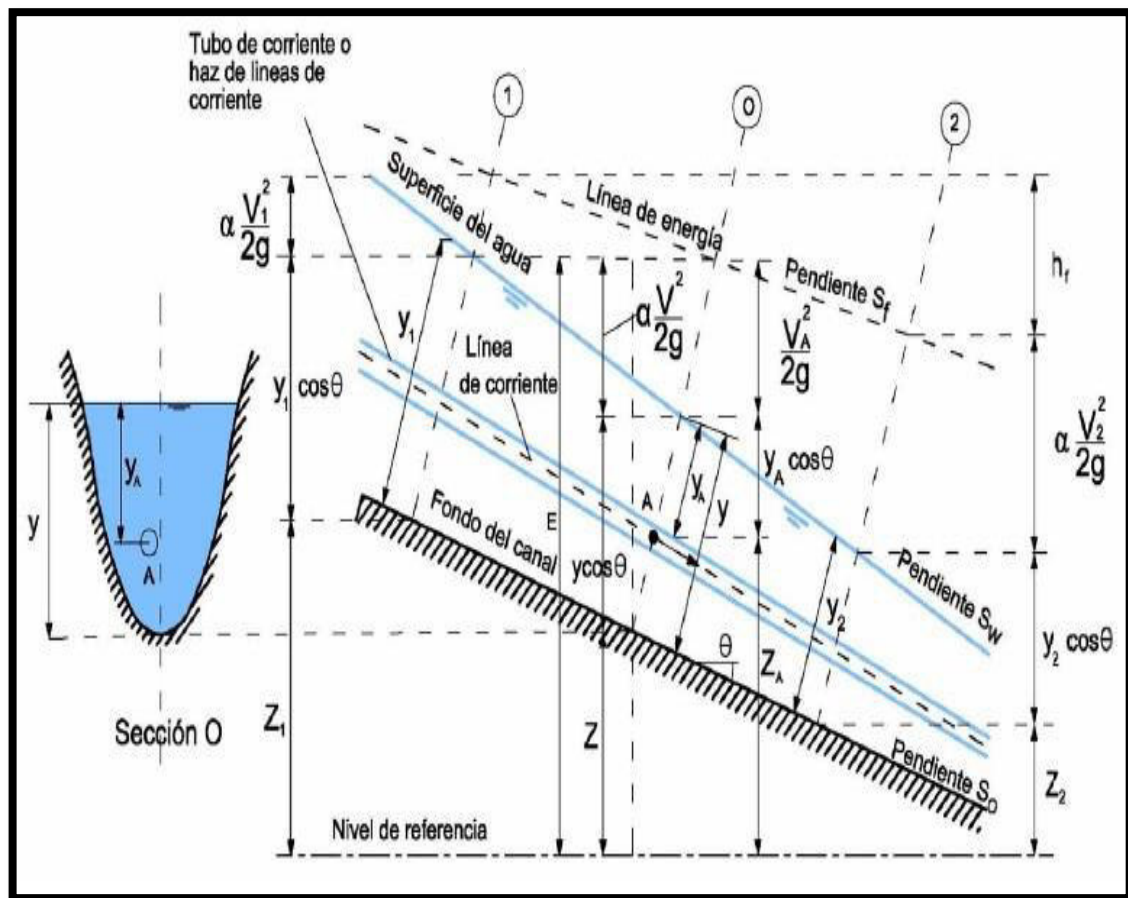


Figura 3. Energía del flujo en un canal abierto

Fuente: Chow, 1994.

$$H = z + y \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (2.2)$$

Dónde:

H = altura total de una sección (m)

z = elevación por encima del plano de referencia (m)

y = tirante o profundidad por debajo de la superficie del agua (m)

$\frac{V^2}{2g}$ = altura de velocidad del flujo (m)

θ = ángulo de la pendiente del fondo del canal (grados sexagesimales)

α = coeficiente de Coriolis

De acuerdo con el principio de conservación de energía para la ecuación (2.2), la altura de energía total en la sección 1 aguas arriba debe ser igual a la altura de energía total en la sección 2 aguas abajo más la pérdida de energía h_f entre las dos secciones. (Chow, 1994)

$$z_1 + y_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2.3)$$

La ecuación de energía (2.3) para un canal de pendiente pequeña donde se puede considerar $h_f = 0$ y $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ se convierte en: (Chow, 1994)

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = \text{constante} \quad (2.4)$$

2.1.3. Energía específica en canales abiertos

La energía específica se define como la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad. (Chow, 1994)

De la ecuación (2.2) para un canal de pendiente pequeña donde se puede considerar, $z = 0$ y $\alpha = 1$ obtenemos: (Chow, 1994)

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (2.5)$$

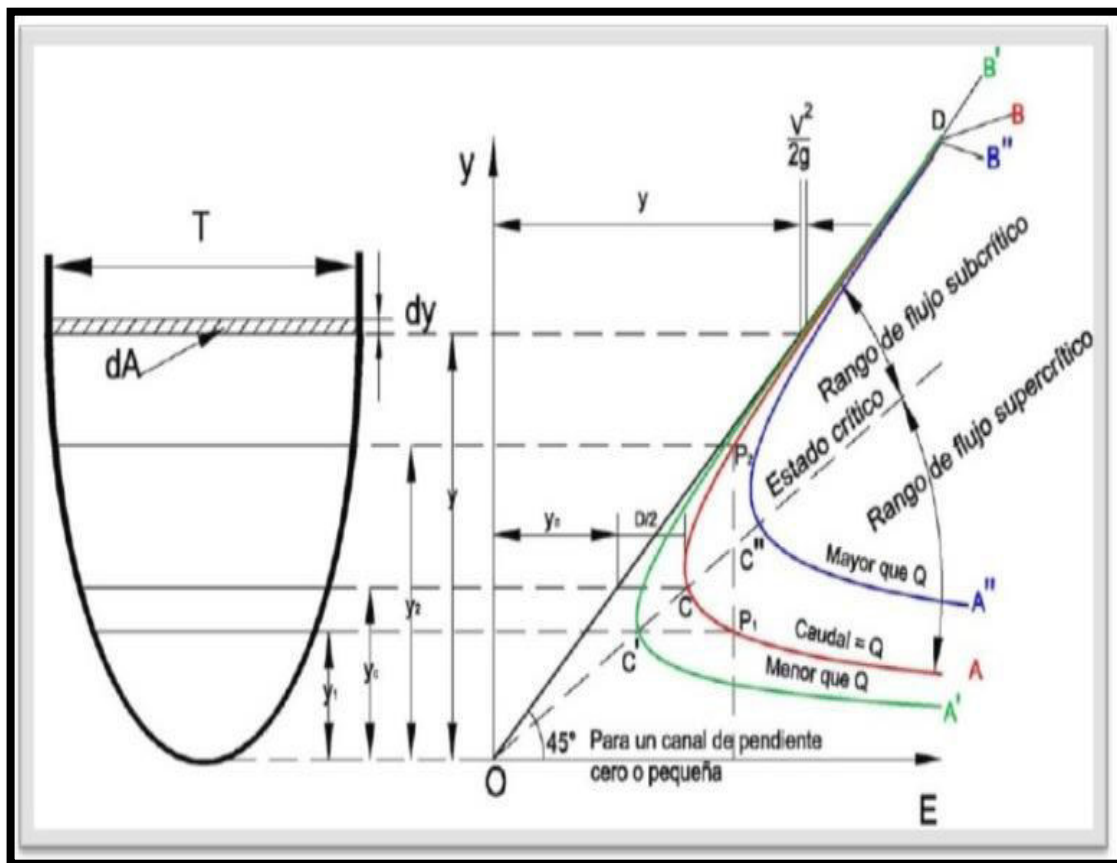


Figura 4. Curva de la energía específica
Fuente: Chow, 1994.

2.1.4. Régimen crítico en canales abiertos

El régimen crítico está dada por la ecuación: (Rodríguez, 2008)

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c} \quad (2.6)$$

Esta ecuación indica que dada la forma de la sección del canal y el caudal existe un tirante crítico único. (Rodríguez, 2008)

Para el caso de un canal de sección rectangular donde $A_c = by_c$, $T_c = b$, $q = \frac{Q}{b}$

reemplazaremos estos valores en la ecuación (2.6) para obtener: (Rodríguez, 2008)

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2.7)$$

Dónde:

y_c = tirante crítico (m)

A_c = área hidráulica en régimen crítico (m²)

T_c = espejo de agua en régimen crítico (m)

Q = caudal (m³/s)

q = caudal unitario o caudal por unidad de ancho (m²/s)

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m²/s

2.2. Resalto hidráulico

2.2.1. Definición

Es el ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad, este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, supercrítico a subcrítico. (Arbulú, 2012)

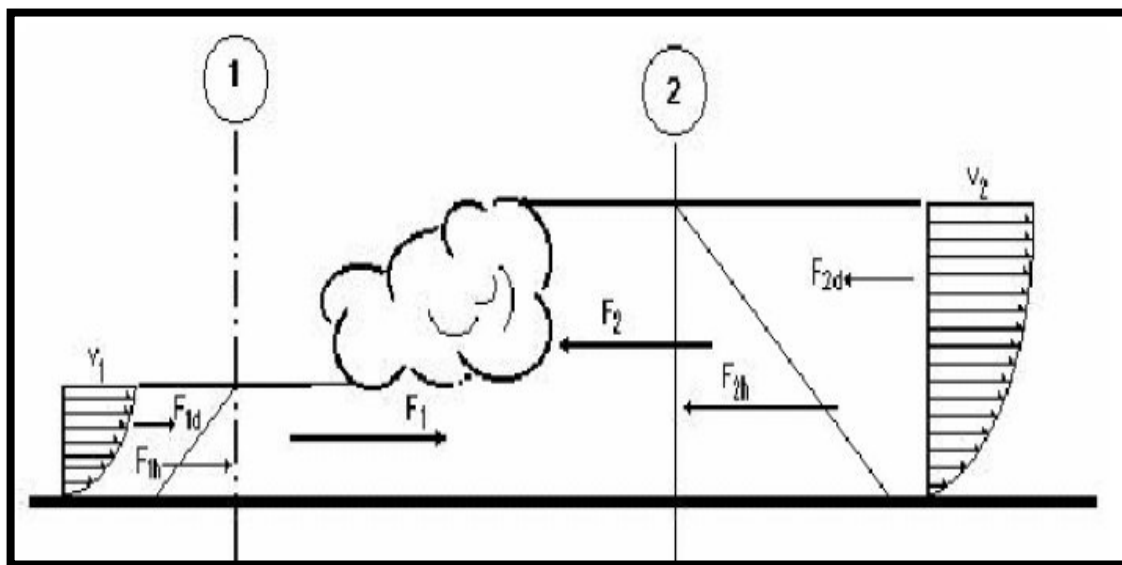


Figura 5. Resalto hidráulico en un canal abierto
Fuente: Arbulú, 2012.

Dónde:

v_1 , v_2 = velocidades en la sección 1 y 2 (m/s)

F_{1d} , F_{2d} = fuerzas dinámicas en la sección 1 y 2 (N)

F_{1h} , F_{2h} = fuerzas hidrostáticas en la sección 1 y 2 (N)

En la sección 1 actúan las fuerzas hidrostática F_{1h} y dinámica F_{1d} , en forma similar, pero en sentido contrario en la sección 2, F_{2h} y F_{2d} . En ambas secciones la sumatoria de fuerzas da como resultado F_1 y F_2 respectivamente. En el estado de equilibrio, estas fuerzas tienen la misma magnitud, pero dirección contraria (la fuerza F_{1h} es menor a F_{2h} , inversamente F_{1d} es mayor a F_{2d}). (Arbulú, 2012)

Para un metro de ancho de un canal, se considera el escurrimiento de una masa de fluido por unidad de tiempo $m = \frac{\rho q}{g}$, el retardo de la masa $m = \frac{\rho q}{g}$ y el impulso total como $F_d = \frac{\rho q}{g}(v_1 - v_2)$. (Arbulú, 2012)

Equilibrando la fuerza resultante y el impulso total: (Arbulú, 2012)

$$F_{1h} - F_{2h} = \frac{\rho y_2^2}{2} - \frac{\rho y_1^2}{2} \quad (2.8)$$

Ahora si expresamos el impulso total como $\frac{\rho}{2}(y_2^2 - y_1^2) = \frac{\rho q}{g}(v_1 - v_2)$ y

considerando la ecuación de continuidad $q = y_1 v_1 = y_2 v_2$ obtenemos: (Arbulú, 2012)

$$y_2^2 + y_2 y_1 - \frac{2 y_1 v_1^2}{g} = 0 \quad (2.9)$$

Resultando el tirante conjugado después del resalto hidráulico: (Arbulú, 2012)

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2v_1^2 y_1}{g}} \quad (2.10)$$

De la ecuación (2.1) donde el número de Froude $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$ para la sección 1

tendremos $F_{r_1} = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}$. (Arbulú, 2012)

Reemplazando $F_{r_1} = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}$ en la ecuación (2.10) permitirá obtener la expresión

adimensional de tirantes conjugados: (Arbulú, 2012)

$$y_2 = \frac{y_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_{r_1}^2} - 1) \quad (2.11)$$

Dónde:

y_1 = tirante conjugado antes del resalto hidráulico (m)

y_2 = tirante conjugado después del resalto hidráulico (m)

F_{r_1} = número de Froude antes del resalto hidráulico

v_1 = velocidad del agua antes del resalto hidráulico (m/s)

q = caudal unitario o caudal por unidad de ancho (m^2/s)

g = aceleración de gravedad = 9.81 m/s^2

2.2.2. Características del resalto hidráulico

- a. Pérdida de energía en el resalto hidráulico (Arbulú, 2012)

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (2.12)$$

- b. Eficiencia del resalto hidráulico (Arbulú, 2012)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{(8F_{r1} + 1)^{3/2} - 4F_{r1} + 1}{8F_{r1}(2 + F_{r1})} \quad (2.13)$$

- c. Altura del resalto hidráulico (Arbulú, 2012)

$$h = y_2 - y_1 \quad (2.14)$$

- d. Longitud del resalto hidráulico (Rodríguez, 2008)

Longitud del resalto hidráulico según Sieñchin:

$$L_{resalto} = K(y_2 - y_1) \quad (2.15)$$

Tabla 1. Valores del coeficiente K para la ecuación de Sieñchin

Sección del Canal	Rectangular			Trapezoidal		
Talud del canal	0.00	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
<i>K</i>	5	7.9	9.2	10.6	12.6	15

Fuente: Rodríguez (2008).

Dónde:

y_1 = tirante conjugado antes del resalto hidráulico (m)

y_2 = tirante conjugado después del resalto hidráulico (m)

E_1 = energía específica antes del resalto hidráulico (m)

E_2 = energía específica después del resalto hidráulico (m)

F_{r1} = número de Froude antes del resalto hidráulico

K = coeficiente variable según la sección del canal

g = aceleración de gravedad = 9.81 m/s^2

Longitud del resalto hidráulico según Bureau of Reclamation:

Un parámetro importante en el diseño de obras hidráulicas es la longitud del resalto hidráulico. (Bureau of Reclamation, 1981)

Definirá la necesidad de incorporar obras complementarias para reducir esta longitud y/o aplicar medidas de protección de la superficie para incrementar su resistencia a las tensiones de corte. (Bureau of Reclamation, 1981)

Los resultados de pruebas experimentales realizadas por el Bureau of Reclamation dan como resultado la curva de la Figura 6. (Bureau of Reclamation, 1981)

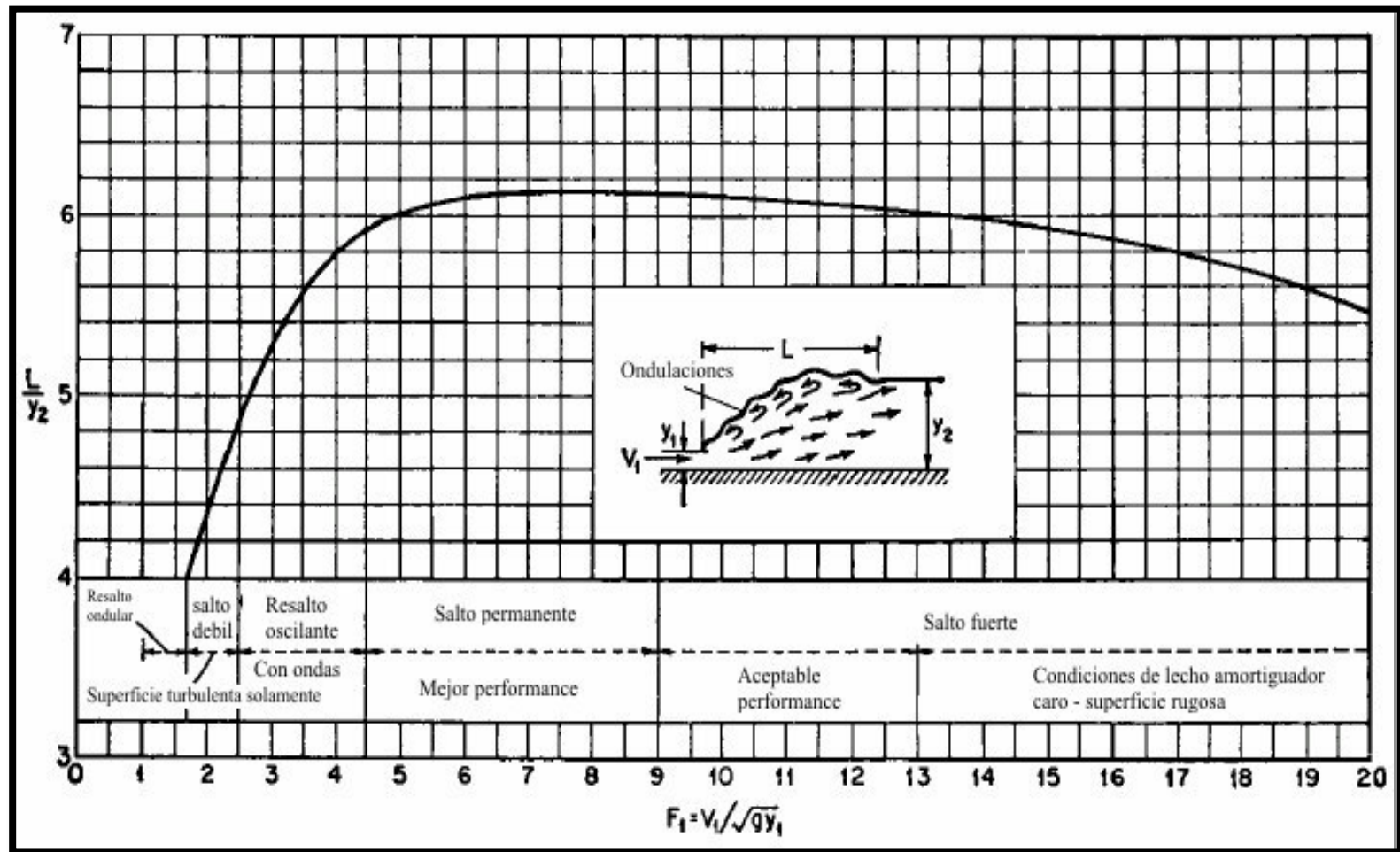


Figura 6. Curva para hallar la longitud del resalto en función del número de Froude
Fuente: Bureau of Reclamation, 1981.

Tabla 2. Tipos y características de resalto hidráulico según el número de Froude

F_{r1}	Tipo de Resalto Hidráulico	Características del Resalto Hidráulico
$F_{r1} < 1$	No se forma	La corriente es subcrítica y seguiría siendo subcrítica.
$F_{r1} = 1$	No se forma	El flujo es crítico y no se presentan condiciones para la formación de un resalto hidráulico
$1 < F_{r1} \leq 1.7$	Ondular	La superficie libre presenta ondulaciones. La disipación de energía es baja, menor del 5%.
$1.7 < F_{r1} \leq 2.5$	Débil	Se generan muchos rodillos de agua en la superficie del resalto, seguidos de una superficie suave y estable, aguas abajo. La energía disipada es del 5 al 15%.
$2.5 < F_{r1} \leq 4.5$	Oscilante	Presenta un chorro intermitente, sin ninguna periodicidad, que parte desde el fondo y se manifiesta hasta la superficie, y retrocede nuevamente. Cada oscilación produce una gran onda que puede viajar largas distancias. La disipación de energía es del 15 al 45%.
$4.5 < F_{r1} \leq 9.0$	Estable	Su acción y posición son poco variables y presenta el mejor comportamiento. La energía disipada en este resalto puede estar entre el 45 y el 70%.
$F_{r1} > 9.0$	Fuerte	Caracterizado por altas velocidades y turbulencia, con generación de ondas y formación de una superficie tosca, aguas abajo. Su acción es fuerte y de alta disipación de energía, que puede alcanzar hasta un 85%.

Fuente: Rodríguez (2008).

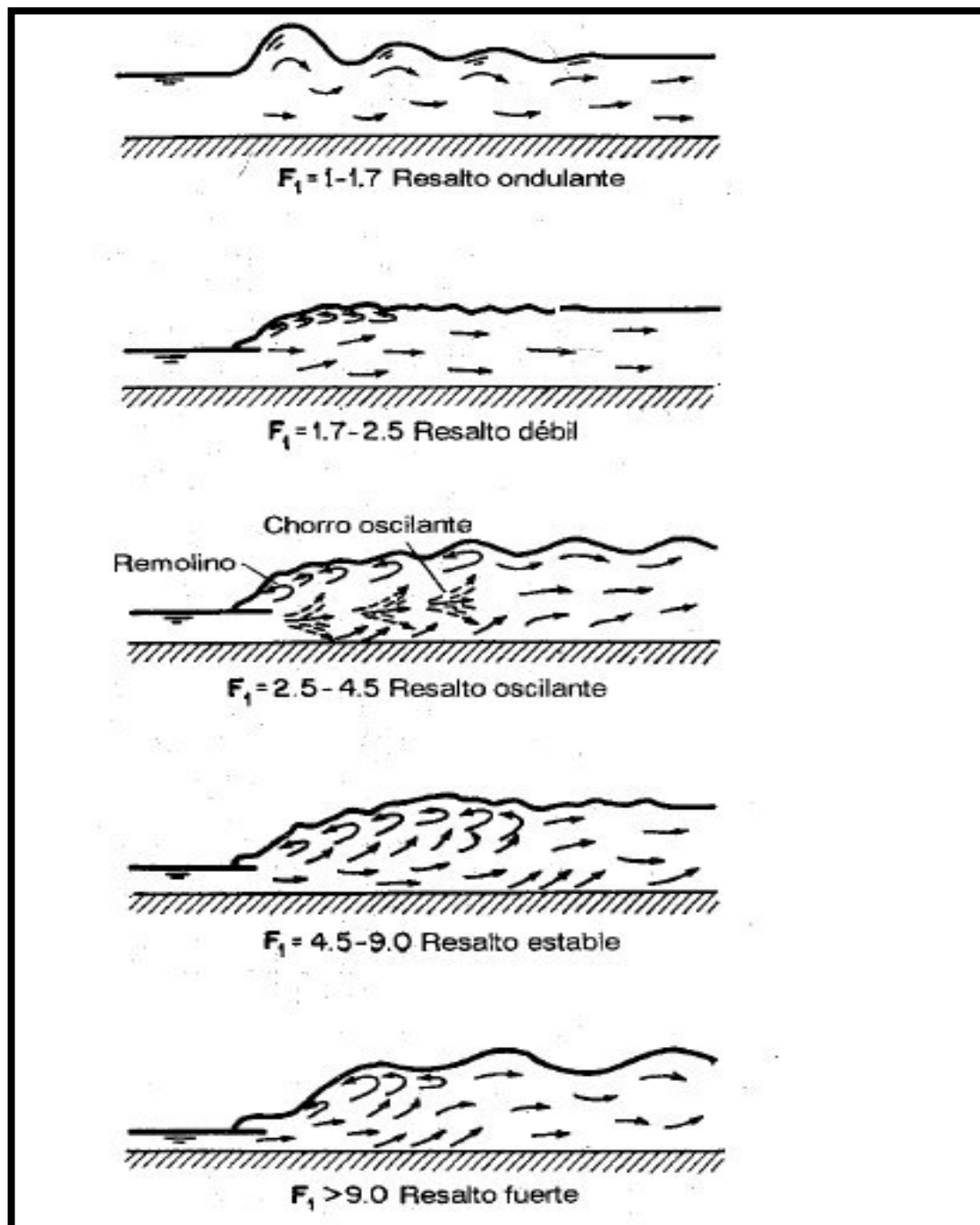


Figura 7. Tipos de resalto hidráulico según el número de Froude
Fuente: Chow, 1994.

2.3. Rápida

Las rápidas son estructuras que sirven para enlazar dos tramos de un canal donde existe un desnivel considerable en una longitud relativamente corta. (Rojas, 2013)

Se diseñan con el objetivo de reducir la velocidad y pasar el flujo de régimen supercrítico a subcrítico. (Rojas, 2013)

Para el diseño es necesario conocer las propiedades hidráulicas, las elevaciones de la rasante y de las secciones del canal aguas arriba y aguas abajo de la rápida, así mismo un perfil longitudinal del tramo donde se ubica la estructura. (Rojas, 2013)

a. Rápidas lisas

Son canales de fondo liso con pendientes adecuadas a las condiciones topográficas del terreno y al caudal que se desea evacuar. (Mejía, 2013)

El agua escurre a velocidad apreciable, llegando al pie de la ladera o talud con gran cantidad de energía cinética. (Mejía, 2013)

El diseño está en función del caudal de diseño por evacuar, de la geometría del canal, de la pendiente del terreno y del material a utilizar. (Mejía, 2013)

El canal debe ser capaz de resistir las velocidades que se den y de conducir el agua sin rebosarse para el periodo de retorno seleccionado. (Mejía, 2013)

Se construye en concreto reforzado, por resistencia a altas velocidades de flujo, por ejemplo, entre 10m/s y 20m/s. (Mejía, 2013)

Por los caudales que se manejan en estos canales muy difícilmente se alcanzan velocidades que superen las indicadas. (Mejía, 2013)

b. Rápidas escalonadas

Son canales con gradas o escalones donde, a la vez que se conduce el agua, se va disipando la energía cinética del flujo por impacto con los escalones. (Mejía, 2013)

No se hace necesaria alguna estructura adicional, o dado el caso, una estructura pequeña. (Mejía, 2013)

Para mayor disipación de energía se pueden aumentar bloques de cemento o salientes en la grada. (Mejía, 2013)

Su diseño debe evaluar la geometría del canal (pendiente, altura y ancho), el caudal de diseño y calcular las características del flujo. (Mejía, 2013)

Seleccionar la altura optima del escalón para obtener el régimen del flujo seleccionado. (Mejía, 2013)

Se debe calcular el contenido de aire disuelto aguas abajo de la estructura y diseñar la cresta de la rápida. (Mejía, 2013)

En los regímenes de flujo saltante se debe airear el salto en su caída libre de un escalón a otro. (Mejía, 2013)

La altura de las paredes del canal debe considerar un borde libre para recoger las posibles salpicaduras o aumentos del caudal no previstos. (Mejía, 2013)

Las rápidas escalonadas puede ser rápidas escalonadas con tapa o rápidas escalonadas con vertedero y pantalla. (Mejía, 2013)

Las rápidas escalonadas cuando forman resalto hidráulico atenúan el golpe del agua. (Mejía, 2013)

c. Rápidas combinadas (lisas y escalonadas)

Son estructuras conformadas por canales de rápidas lisas que incluyen en su desarrollo longitudinal un escalón u otro elemento disipador de la energía cinética del flujo, prescindiendo en la mayoría de los casos del empleo de estructuras disipadoras en el pie de la estructura. (Mejía, 2013)

Estas estructuras requieren de un diseño especial debido a que disipan la energía del flujo a lo largo del canal y no al pie de ésta. (Mejía, 2013)

La estructura de una rápida consiste en: (ver Figura 8) (Villón, 2005)

Transición de entrada

Sección de control

Tramo inclinado

Trayectoria

Disipador de energía (estanque, colchón o poza)

Transición de salida

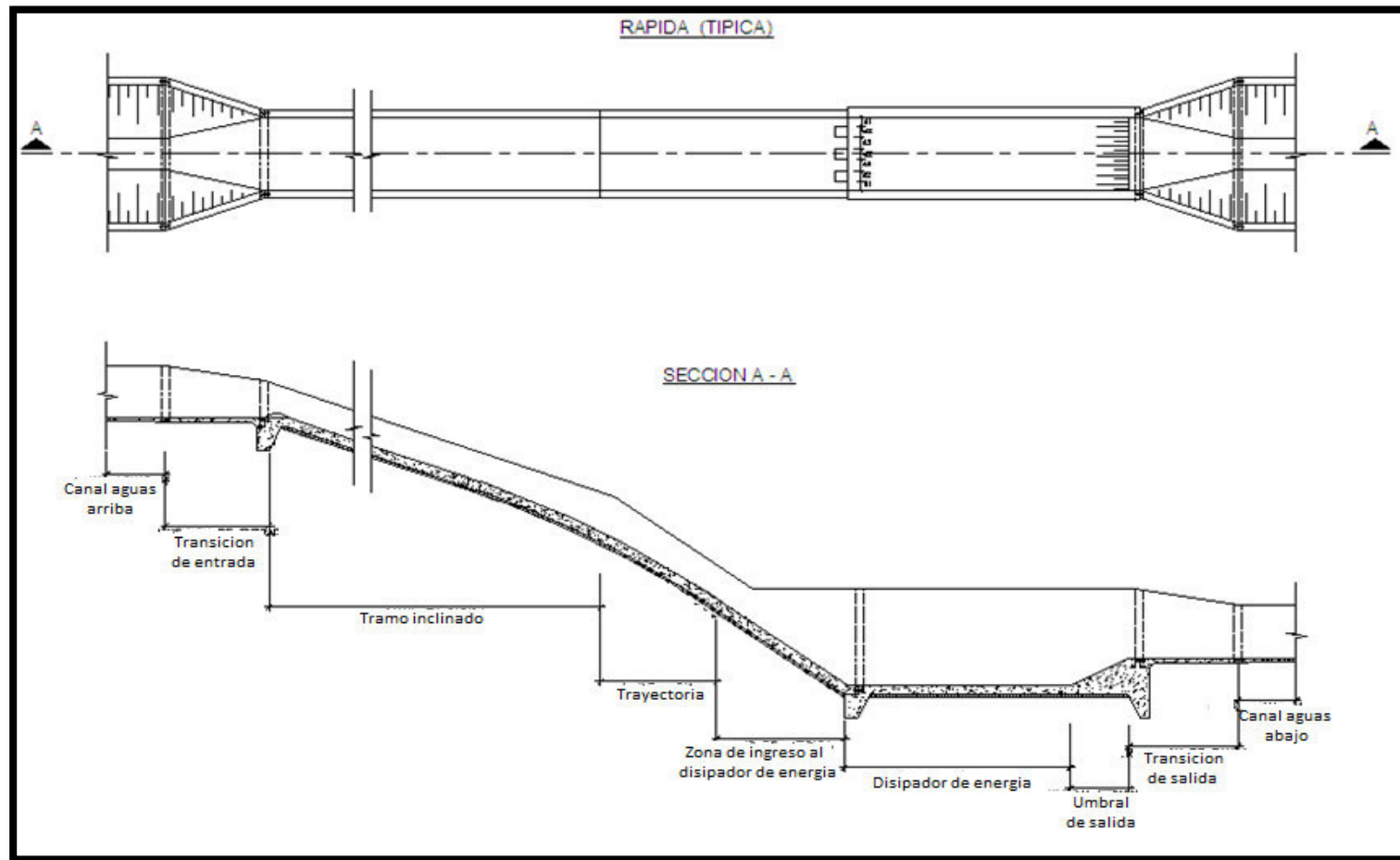


Figura 8. Vista de planta y perfil longitudinal de una rápida en canal abierto
Fuente: Autoría Propia, 2018

2.3.1. Transición de entrada

Una por medio de un estrechamiento progresivo la sección del canal superior con la sección de control. (Villón, 2005)

Su finalidad es evitar que el paso de una sección a la siguiente de dimensiones y características diferentes se realice de un modo brusco, reduciendo de ese modo las pérdidas de carga en el canal. (Villón, 2005)

Para el diseño se debe definir la longitud de la transición de entrada de modo que las pérdidas en el paso entre el canal superior y la sección de control sean las mínimas posibles. (Villón, 2005)

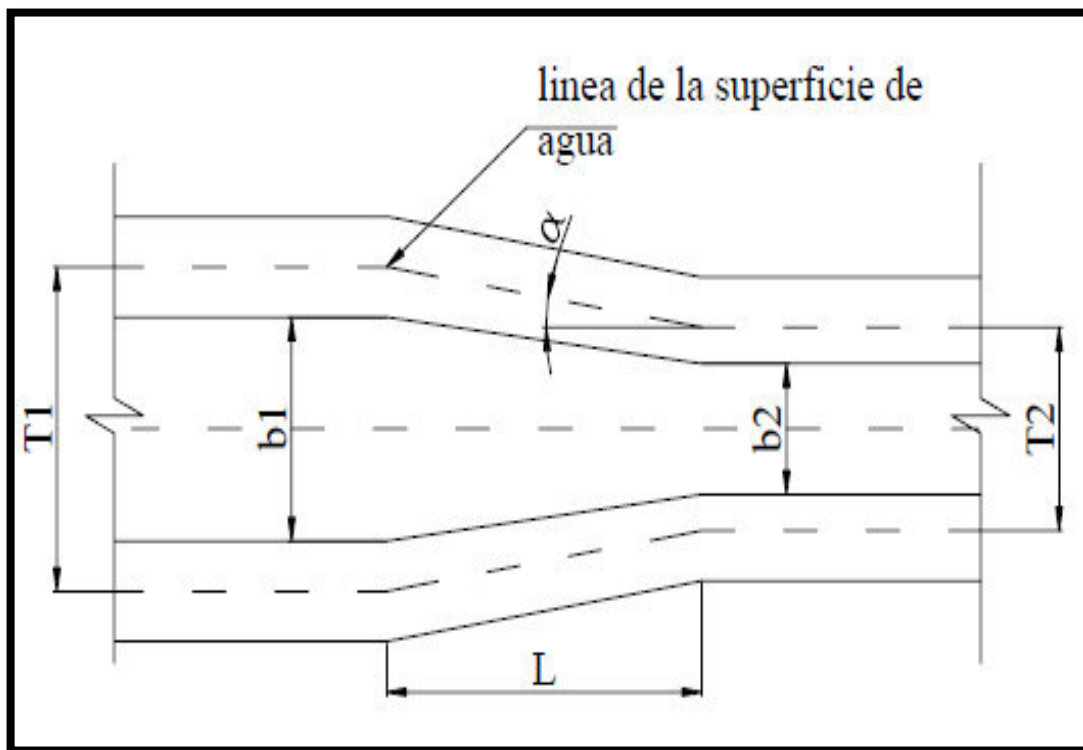


Figura 9. Vista de planta de una transición lineal de entrada
Fuente: Arbulú, 2012.

La longitud de la transición de entrada se halla mediante: (Villón, 2005)

$$L_{\text{transicion de entrada}} = \frac{T_1 - T_c}{2tg\alpha} \quad (2.16)$$

Dónde:

$L_{\text{transicion de entrada}}$ = longitud de la transición de entrada (m)

T_1 = espejo de agua en el canal aguas arriba (m)

T_c = espejo de agua en la sección de control (condición de flujo crítico) (m)

α = ángulo que forman los espejos de agua T_1 y T_c ($^{\circ}$ sexagesimales)

En la transición de entrada se tienen pérdidas por fricción que se producen debido a la fricción de las partículas de agua entre sí y contra las paredes del canal, las pérdidas por fricción en la transición de entrada se determinan mediante: (Villón, 2005)

$$\Delta h_f = S_E L_{\text{transicion de entrada}} \quad (2.17)$$

Dónde:

Δh_f = pérdidas por fricción en la transición de entrada (m)

$L_{\text{transicion de entrada}}$ = longitud de la transición de entrada (m)

S_E = pendiente de fricción promedio en la transición de entrada

La pendiente promedio de fricción en la transición de entrada se determina de la siguiente manera: (Villón, 2005)

$$S_E = \frac{S_{\text{cota1}} + S_c}{2} \quad (2.18)$$

Dónde:

S_{cota1} = pendiente en la cota 1

S_c = pendiente crítica (condición crítica)

También se tienen pérdidas por convergencia en la transición de entrada donde la velocidad de entrada es menor que la velocidad de salida por consiguiente la superficie de agua debe caer, las perdidas por convergencia en la transición de entrada se determinan mediante: (Chow, 1994)

$$h_c = C_i \Delta h_v \quad (2.19)$$

Dónde:

h_c = pérdidas por convergencia en la transición de entrada (m)

C_i = coeficiente de pérdidas por convergencia en la transición de entrada

Δh_v = variación de altura de las velocidades en la sección de control y la cota 1 (m)

Tabla 3. Valores de los coeficientes de pérdidas en las transiciones

Tipo de Transición	c_i	c_o
Alabeado	0.10	0.20
Cuadrante de cilindro	0.15	0.25
Simplificado en línea recta	0.20	0.30
Línea recta	0.30	0.50
Extremos cuadrados	0.30	0.75

Fuente: Chow (1994).

Nota: c_i (entrada) , c_o (salida)

La variación de altura de las velocidades en la sección de control y la cota 1 se determina de la siguiente manera: (Chow, 1994)

$$\Delta h_v = \frac{V_c^2}{2g} - \frac{V_{\text{cota1}}^2}{2g} \quad (2.20)$$

Dónde:

V_c = velocidad crítica (sección de control) (m/s)

V_{cota1} = velocidad en la cota 1 (m/s)

g = aceleración de gravedad = 9.81 m/s^2

2.3.2. Sección de control

Es la sección correspondiente al punto donde comienza la pendiente fuerte de la rápida, manteniéndose en este punto las condiciones críticas. (Villón, 2005)

En la rápida generalmente se mantiene una pendiente mayor que la necesaria para mantener el régimen crítico, por lo que el tipo de flujo que se establece es el flujo supercrítico. (Villón, 2005)

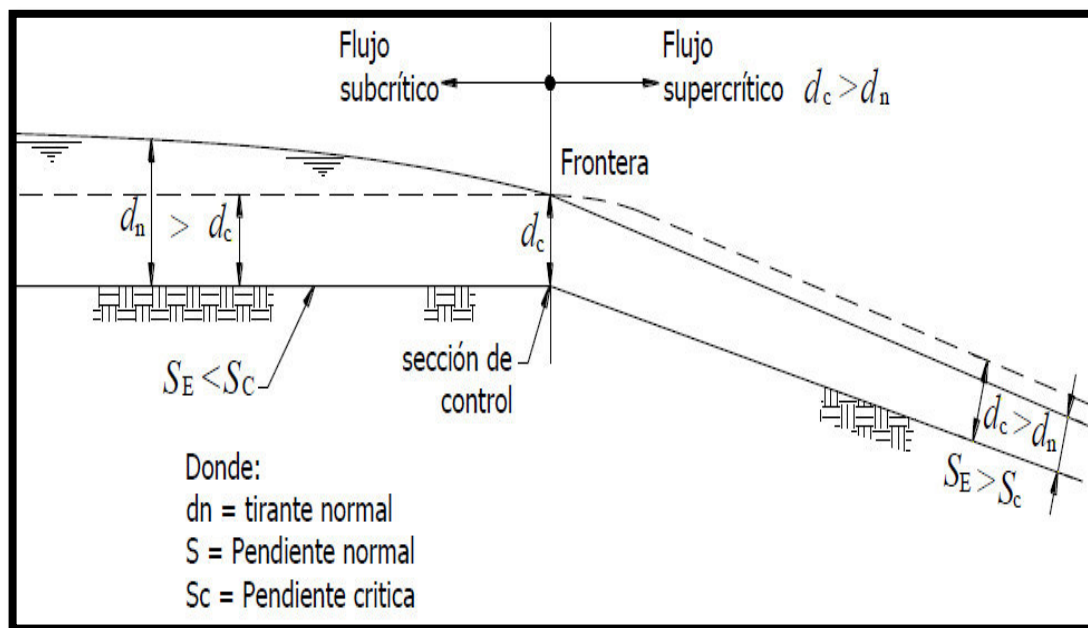


Figura 10. Régimen crítico en la sección de control

Fuente: Rodríguez, 2008.

El tirante crítico (canal rectangular) se halla con la ecuación (2.7) (Rodríguez, 2008)

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}, \text{ donde } q \text{ es caudal unitario (m}^2/\text{s) y } g \text{ es la aceleración de la gravedad (m/s}^2\text{)}$$

En vertederos rectangulares de cresta aguda o delgada: (Chow, 1994)

$$b_0 < \frac{2}{3}h \quad (2.21)$$

Dónde:

Q = caudal (m^3/s)

b_o = espesor de la pared del vertedero (m)

h = carga sobre el vertedero (m)

En vertederos rectangulares de cresta ancha sin contracción: (Chow, 1994)

$$Q = 1.45bh^{\frac{3}{2}} \quad (2.22)$$

Dónde:

Q = caudal (m^3/s)

b = ancho de solera del vertedero (m)

h = carga sobre el vertedero (m)

En una sección de control (flujo crítico) de un canal rectangular: (Chow, 1994)

$$E_{\min} = \frac{3}{2} y_c \quad (2.23)$$

Dónde:

E_{\min} = energía específica mínima (m)

y_c = tirante critico en la sección de control (m)

2.3.3. Tramo inclinado

El tramo inclinado o canal de la rápida es la sección comprendida entre la sección de control y el principio de la trayectoria. (Villón, 2005)

Puede tener de acuerdo a la configuración del terreno una o varias pendientes. (Villón, 2005)

La sección usual para una rápida abierta es la sección rectangular, pero las características de flujo de otras formas de sección deben ser consideradas donde la supresión de ondas es una importante parte del diseño. (Rojas, 2013)

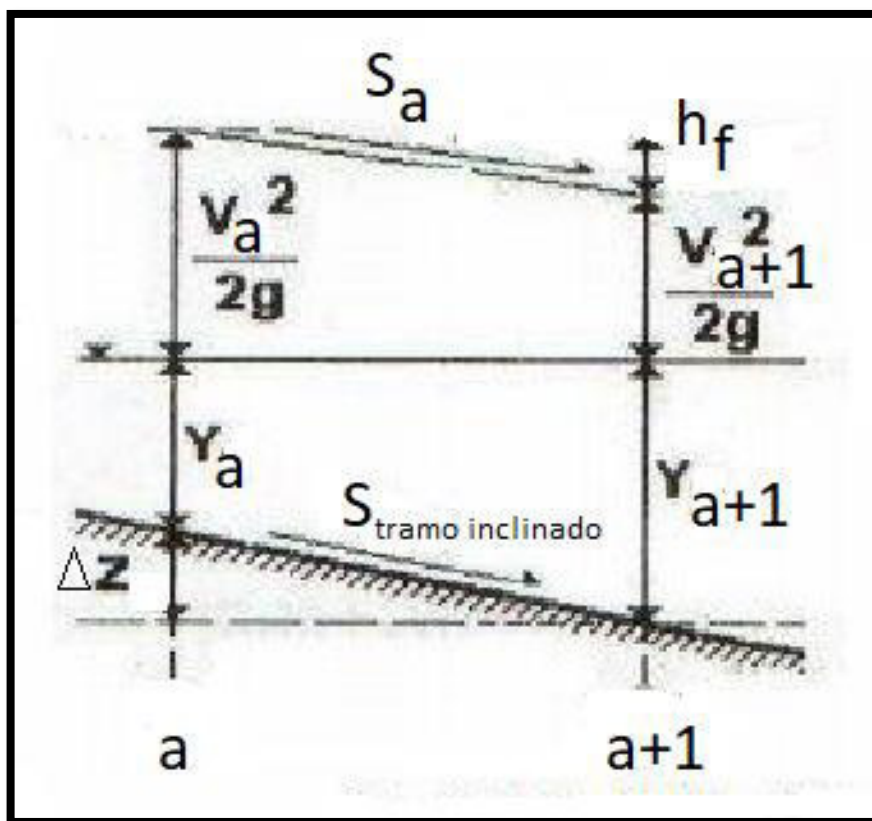


Figura 11. Líneas de energía en el tramo inclinado
Fuente: Autoría propia, 2018.

En el tramo inclinado tenemos las siguientes relaciones: (Villón, 2005)

$$\Delta Z = \frac{\text{desnivel del tramo inclinado}}{\text{número de tramos}} \quad (2.24)$$

$$\Delta h_f = S_a L_i \quad (2.25)$$

$$S_a = \left(\frac{n V_a}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$L_i = \Delta L \sqrt{1 + S_{\text{tramo inclinado}}^2} \quad (2.27)$$

Dónde:

$S_{\text{tramo inclinado}}$ = pendiente del tramo inclinado

S_a = pendiente de fricción entre el punto a y $a+1$ del tramo inclinado

ΔZ = desnivel entre el punto a y $a+1$ del tramo inclinado (m)

$\Delta L = \frac{\text{longitud horizontal del tramo inclinado}}{\text{número de tramos}}$ (m)

L_i = longitud del tramo inclinado entre el punto a y $a+1$ (m)

Δh_f = pérdidas por fricción (m)

R_a = radio hidráulico en el punto a del tramo inclinado (m)

V_a = velocidad en el punto a del tramo inclinado (m/s)

n = coeficiente de rugosidad de Manning

Para hallar los tirantes en el tramo inclinado usaremos la ecuación de la energía:
(Villón, 2005)

$$E_1 + \Delta Z = E_2 + \Delta h_f \quad (2.28)$$

Dónde:

E_1 = energía específica en el punto 1 (m)

E_2 = energía específica en el punto 2 (m)

ΔZ = desnivel del tramo inclinado entre el punto 1 y 2 (m).

Δh_f = pérdidas por fricción del tramo inclinado entre el punto 1 y 2 (m)

De igual forma y con la misma ecuación (2.28) se hallarán todos los tirantes en el tramo inclinado, generalizando obtenemos:

$$E_a + \Delta Z = E_{a+1} + \Delta h_f \quad (2.29)$$

Dónde:

E_a = energía específica en el punto a (m)

E_{a+1} = energía específica en el punto $a+1$ (m)

ΔZ = desnivel del tramo inclinado entre el punto a y $a+1$ (m)

Δh_f = pérdidas por fricción del tramo inclinado entre el punto a y $a+1$ (m)

El borde libre en el canal de la rápida se puede obtener utilizando la fórmula empírica. (Villón, 2005)

$$b.l._{\text{tramo inclinado}} = 0.61 + 0.00371v\sqrt{y} \quad (2.30)$$

Dónde:

$b.l._{\text{tramo inclinado}}$ = borde libre del tramo inclinado (m)

y = tirante del primer punto en el tramo inclinado (m)

v = velocidad del primer punto en el tramo inclinado (m/s)

Para utilizar la fórmula es necesario determinar los tirantes de agua “ y ” (los tirantes deben ser medidos perpendiculares al tramo inclinado) y las velocidades “ v ” (las velocidades deben ser medidas paralelas al tramo inclinado) existentes en distintos puntos a lo largo de la rápida. (Villón, 2005)

Estas se pueden obtener considerando un tirante crítico en la energía en tramos sucesivos. (Villón, 2005)

El tirante y la velocidad que se utilizan en la ecuación (2.30) son los obtenidos para el primer punto ubicado en el tramo inclinado, además el borde libre se mide normal al fondo del tramo inclinado. (Villón, 2005)

2.3.4. Trayectoria

Es la curva que une la última pendiente de la rápida con el plano inclinado del principio del colchón amortiguador. Debe diseñarse de modo que la corriente de agua permanezca en contacto con el fondo del canal y no se produzcan vacíos. (Villón, 2005)

Si la trayectoria se calcula con el valor de la aceleración de la gravedad como componente vertical no habrá presión del agua sobre el fondo y el espacio ocupado por el aire aumentará limitándose así la capacidad de conducción del canal, por lo que se acostumbra usar como componente vertical un valor inferior a la aceleración para que la lámina de agua se adhiera al fondo del canal. (Villón, 2005)

La pendiente de este tramo sería entre 1.5:1 y 3:1, con una pendiente de 2:1 preferentemente. Pendientes más suaves pueden ser usadas en casos especiales, pero no deben usar pendientes más suaves que 6:1. (Rojas, 2013)

La trayectoria parabólica está definida por la siguiente ecuación: (Villón, 2005)

$$y = -(x \operatorname{tg} \theta + \frac{gx^2}{2v_{\max}^2} (1 + \operatorname{tg}^2 \theta)) \quad (2.31)$$

Dónde:

y = coordenada vertical (ordenada) (m)

x = coordenada horizontal (abscisa) (m)

θ = ángulo formado por la horizontal y el tramo inclinado ($^{\circ}$ sexagesimales)

g = aceleración de la gravedad = $9.81 \text{ m}^2/\text{s}$

2.3.5. Disipador de energía (estanque, colchón o poza)

Colchón hidráulico, se hace necesario cuando no es posible lograr la disipación de energía deseada de manera natural, es decir, cuando el tirante conjugado necesario es menor al tirante existente aguas abajo. (Arbulú, 2012)

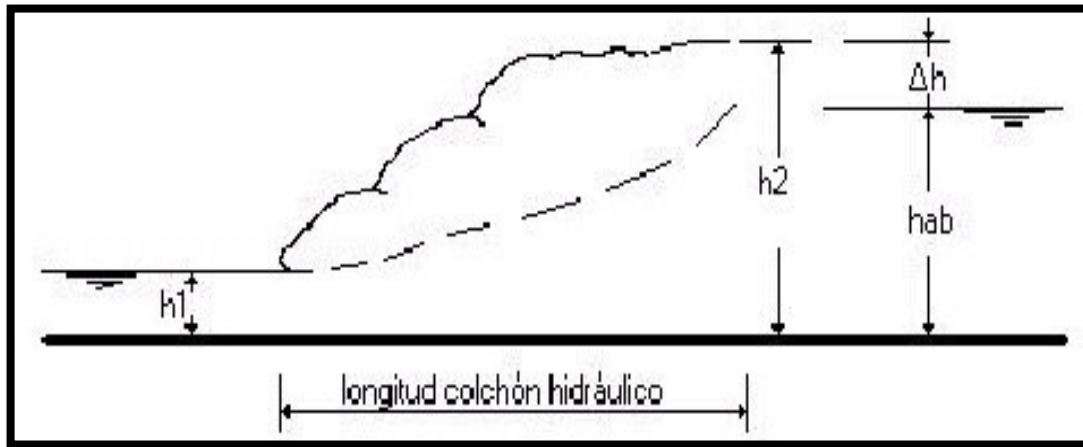


Figura 12. Colchón hidráulico como disipador de energía
Fuente: Arbulú, 2012.

Dónde:

$$\Delta h = h_2 - h_{ab} \text{ (m)}$$

$$h_{ab} = \text{tirante aguas abajo (m)}$$

$$h_1 = \text{tirante conjugado antes del resalto hidráulico (m)}$$

$$h_2 = \text{tirante conjugado después del resalto hidráulico (m)}$$

En muy pocos casos el tirante conjugado h_2 del resalto será idéntico al tirante disponible aguas abajo h_{ab} ; en general h_2 será mayor a h_{ab} presentándose un déficit Δh .
(Arbulú, 2012)

Colchón hidráulico con cuenco amortiguador, tiene su aplicación en vertederos de excedencias, rápidas y estructuras de caída libre. Al pie de la estructura se presenta el tirante mínimo h_{\min} (energía específica máxima). Para la formación del resalto será necesario contar con un tirante aguas abajo h_{ab} igual a h_2 . (Arbulú, 2012)

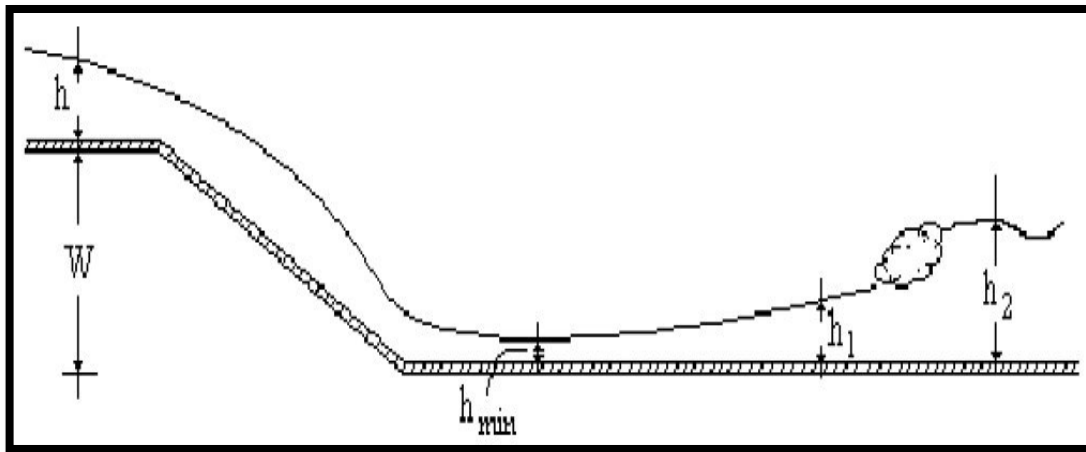


Figura 13. Resalto hidráulico cuando $h_{\min} < h_1$
Fuente: Arbulú, 2012.

Si $h_{\min} < h_2$, el resalto no se formará en la sección 1, si no que por efecto de su energía cinética, la zona de régimen subcrítico se desplazará aguas abajo, hasta encontrar un tirante que sea próximo al tirante conjugado; en este caso $h_{\min} < h_1$. (Arbulú, 2012)

Además, la zona de régimen supercrítico alcanzará una longitud apreciable que será mayor a la longitud máxima definida por las condiciones límite del proyecto en cuestión, para incrementar el tirante de aguas abajo existen varias posibilidades, como profundizar la solera o construir un travesaño de fondo, incrementar la rugosidad de la solera, reducir el ancho de la sección, reducir la pendiente de la solera, etc. (Arbulú, 2012)

Colchón hidráulico profundizado su nivel de solera, en la zona del colchón hidráulico incrementará la altura de caída y en consecuencia la disminución del tirante h_{min} y un tirante conjugado h_2 mayor. En el colchón hidráulico no sólo se presenta una compensación geométrica del tirante aguas abajo, sino que la confinación del resalto genera una mayor intensidad de choques en las partículas de agua. (Arbulú, 2012)

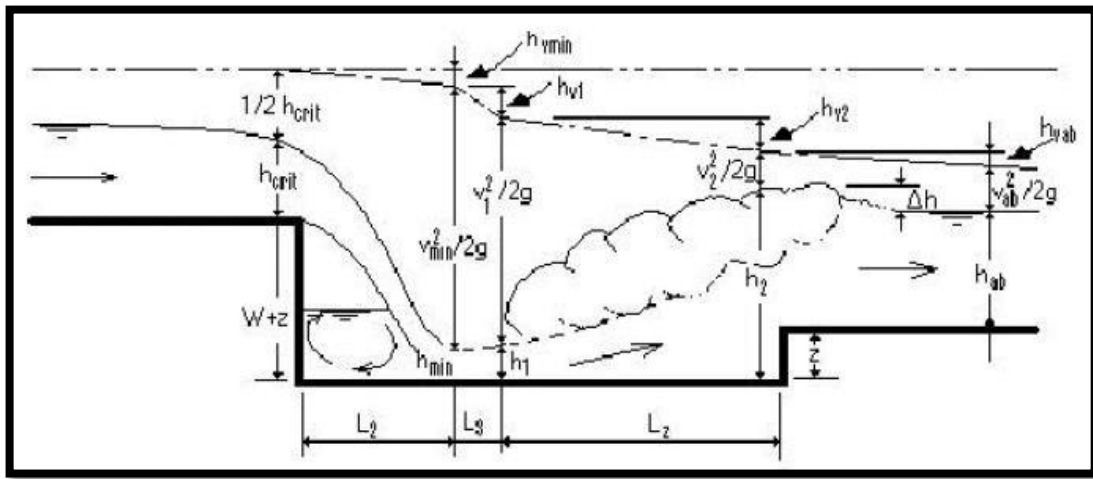


Figura 14. Colchón hidráulico con su solera profundizada
Fuente: Arbulú, 2012.

La profundidad necesaria z del colchón hidráulico será: (Arbulú, 2012)

$$Z = \Delta h \left[n + \frac{W(1-n)}{h_{crit}(1-n)+1} \right] \quad (2.32)$$

Dónde:

$$n = 0.65 - 0.5Fr_{ab}$$

Fr_{ab} = número de Froude aguas abajo.

Colchón hidráulico con travesaño en el fondo, dependiendo de las condiciones que presenta la obra, también es posible la formación de un colchón hidráulico con la aplicación de un travesaño de fondo, cuya misión será elevar el tirante aguas abajo hasta niveles que compensen el déficit del tirante conjugado. (Arbulú, 2012)

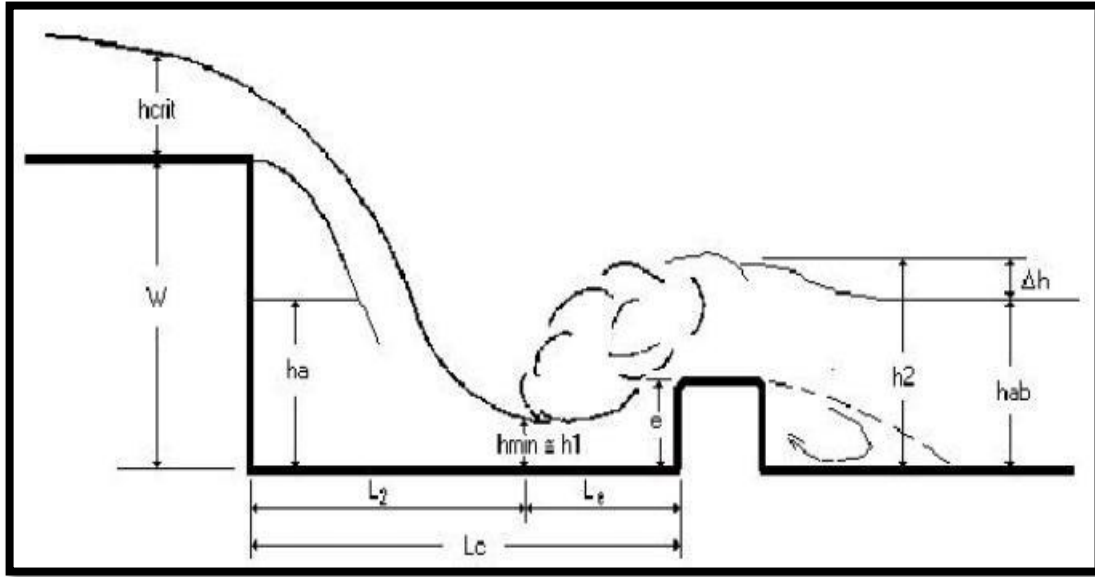


Figura 15. Colchón hidráulico con travesaño en el fondo
Fuente: Arbulú, 2012.

La altura necesaria e es calculada por siguiente expresión: (Arbulú, 2012)

$$e = 0.75 \left(\frac{h_{ab}}{h_{crit}} \right)^3 \frac{h_{min}}{h_{crit}} \Delta h \quad (2.33)$$

Dónde:

$$\Delta h = h_2 - h_{ab} \text{ (m)}$$

$$h_2 = \text{tirante conjugado después del resalto hidráulico (m)}$$

$$h_{ab} = \text{tirante aguas abajo (m)}$$

Los estanques amortiguadores cuentan con: (Bureau of Reclamation, 1981)

a. Dientes deflectores, son elementos que se ubican a la entrada del estanque para fragmentar el chorro e incrementar la profundidad del flujo que entra a dicha estructura.

(Bureau of Reclamation, 1981)

b. Dados amortiguadores, son instalados en los estanques con el propósito de estabilizar la formación del resalto hidráulico y aumentar la turbulencia del flujo con lo cual se logra una mejor disposición. (Bureau of Reclamation, 1981)

c. Umbral terminal, son aquellos que se construyen al final del estanque con el propósito de controlar la erosión que se producirá en el lecho del río, algunas pruebas confirman que este elemento incrementa la eficiencia del estanque pues este reduce la erosión del cauce aguas abajo. (Bureau of Reclamation, 1954)

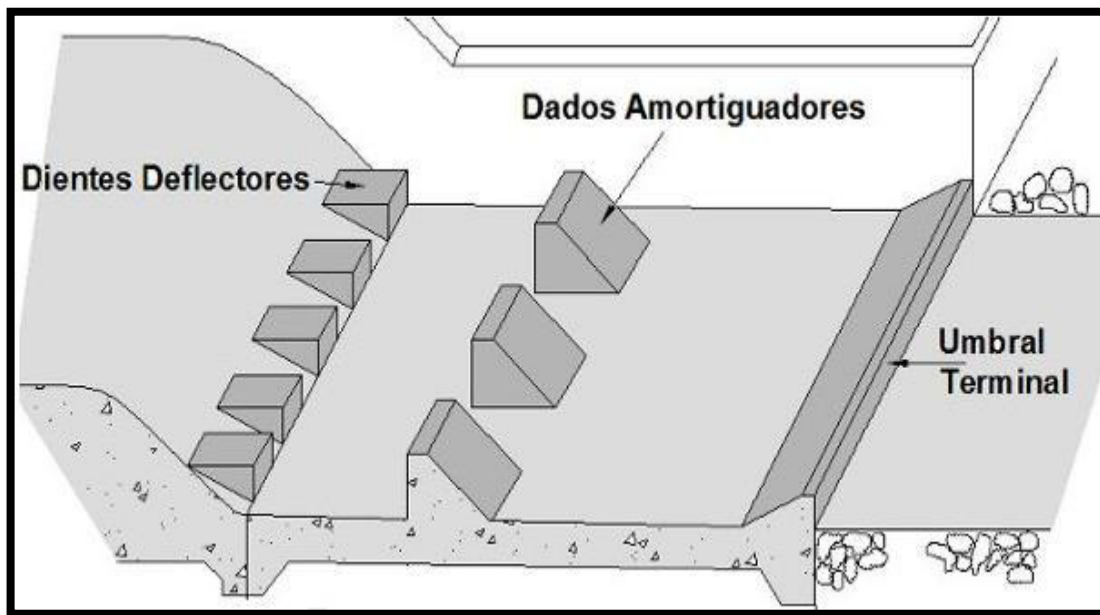


Figura 16. Elementos que conforman un estanque amortiguador
Fuente: Villamarín, 2013

Estanque amortiguador USBR Tipo I, deben ser utilizados cuando el número de Froude es menor a 1.7 pero en la práctica este límite puede extenderse a 2.5. Cuando el número de Froude es 1.7 el tirante conjugado y_2 es aproximadamente el doble del tirante de llegada o aproximadamente 40% mayor que el tirante crítico. La velocidad de salida V_2 es aproximadamente la mitad de la velocidad de llegada o un 30% menor que la velocidad crítica. Las longitudes del canal más allá del punto dónde el tirante comienza a cambiar no deben ser menores que $4 y_2$. (Bureau of Reclamation, 1981)

En la Figura 17 se visualiza: (Bureau of Reclamation, 1981)

- a. La longitud del resalto hidráulico (m).
- b. Relación entre $\frac{h_{ab}}{y_1}$ y el número de Froude.
- c. Relación entre $\frac{L_1}{y_2}$ y el número de Froude.
- d. Relación entre la pérdida de energía en porcentaje y el número de Froude.

Dónde:

y_1 = tirante conjugado antes del resalto hidráulico (m)

y_2 = tirante conjugado después del resalto hidráulico (m)

L_1 = longitud del resalto hidráulico (m)

h_{ab} = tirante aguas abajo (m)

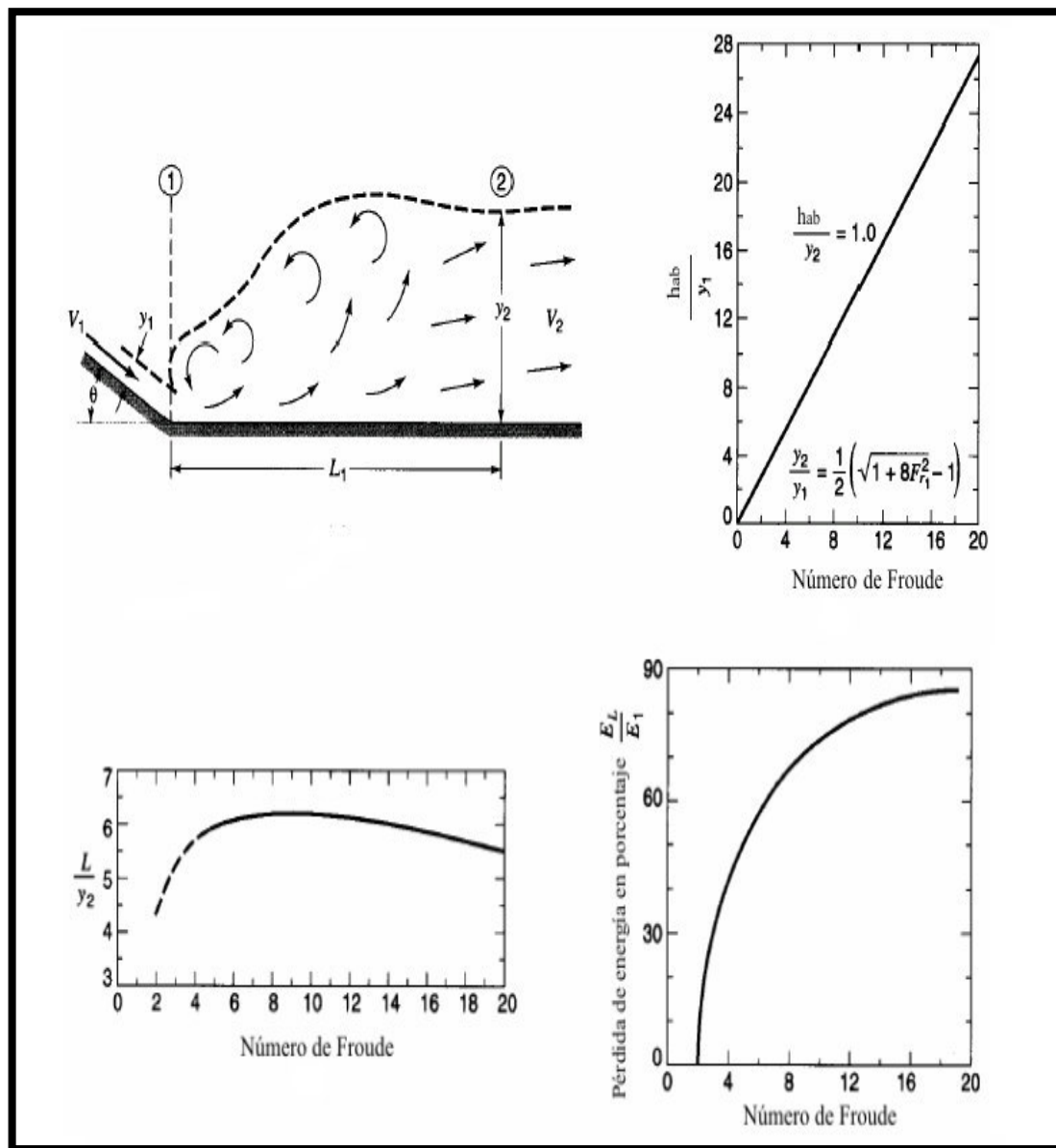


Figura 17. Curvas para hallar parámetros de un estanque amortiguador USBR Tipo I
Fuente: Bureau of Reclamation, 1981.

Estanque amortiguador USBR Tipo II, se desarrolló para cuencos disipadores de uso común en vertederos de presas altas, de presas de tierra y para estructuras de canales grandes. (Bureau of Reclamation, 1981)

El estanque contiene bloques en la rápida del extremo de aguas arriba y un umbral dentado cerca del extremo de aguas abajo. (Bureau of Reclamation, 1981)

No se utilizan bloques de impacto debido a que las velocidades relativamente altas que entran al resalto pueden causar cavitación en dichos bloques. (Bureau of Reclamation, 1981)

Este tipo de disipadores son utilizados cuando el número de Froude está por encima de 4.5 o velocidades mayores a 15 m/s. (Bureau of Reclamation, 1981)

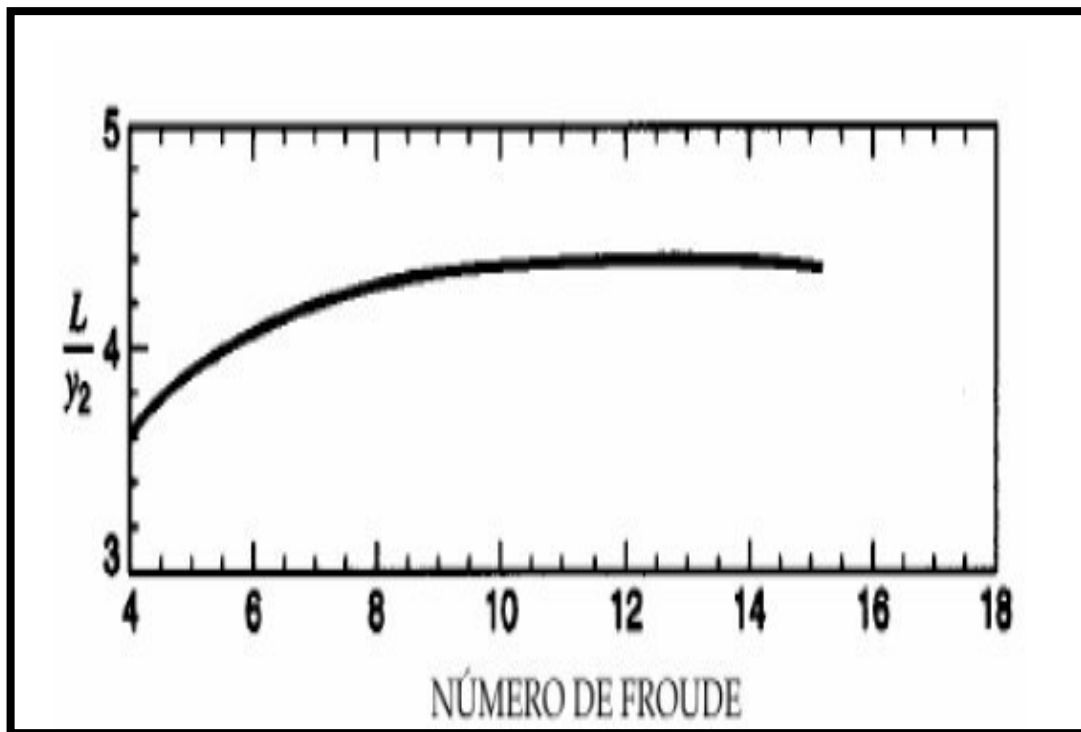


Figura 18. Curva para la longitud del resalto en estanque amortiguador USBR Tipo II
Fuente: Bureau of Reclamation, 1981.

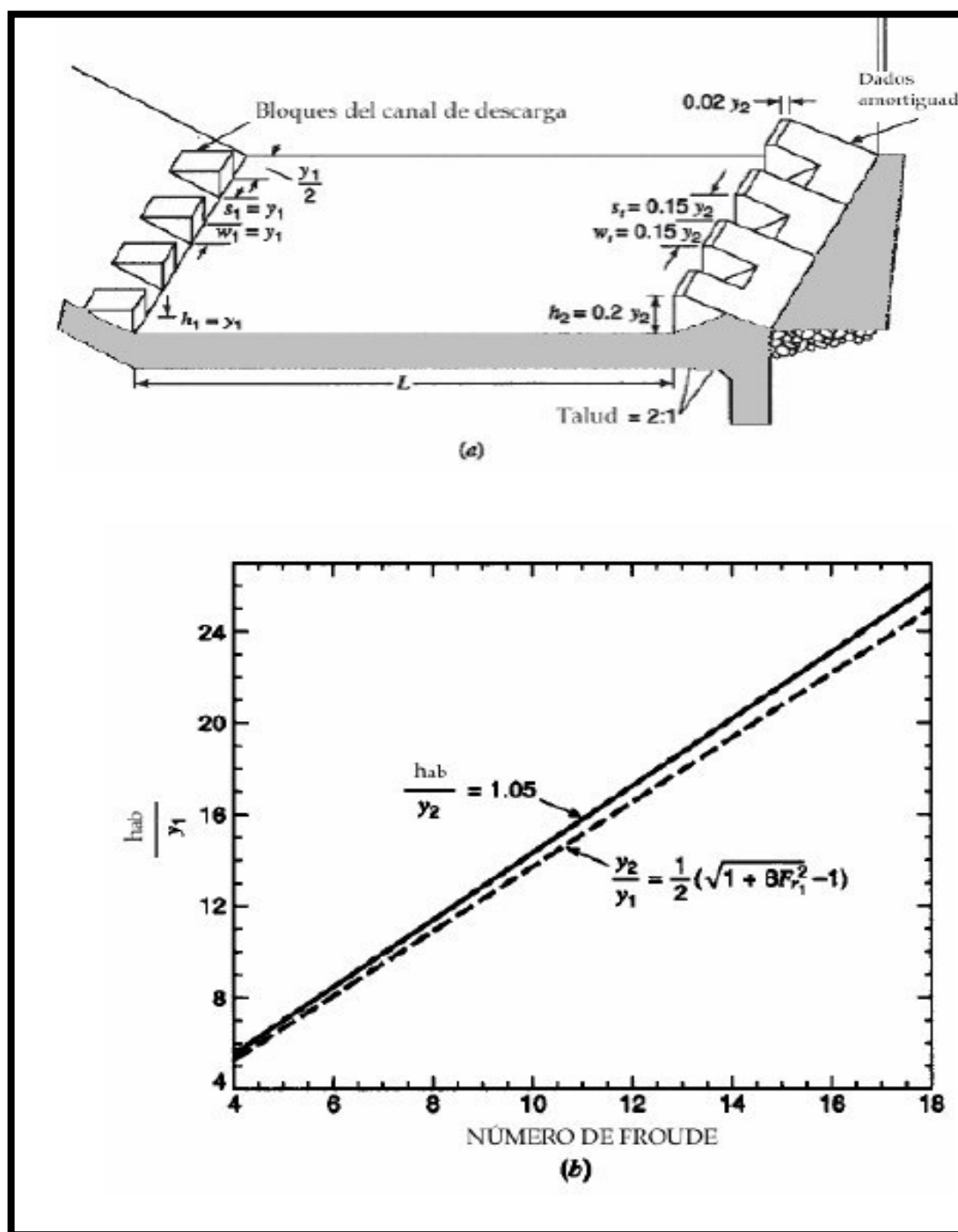


Figura 20. Estanque amortiguador USBR Tipo III
Fuente: Bureau of Reclamation, 1981.

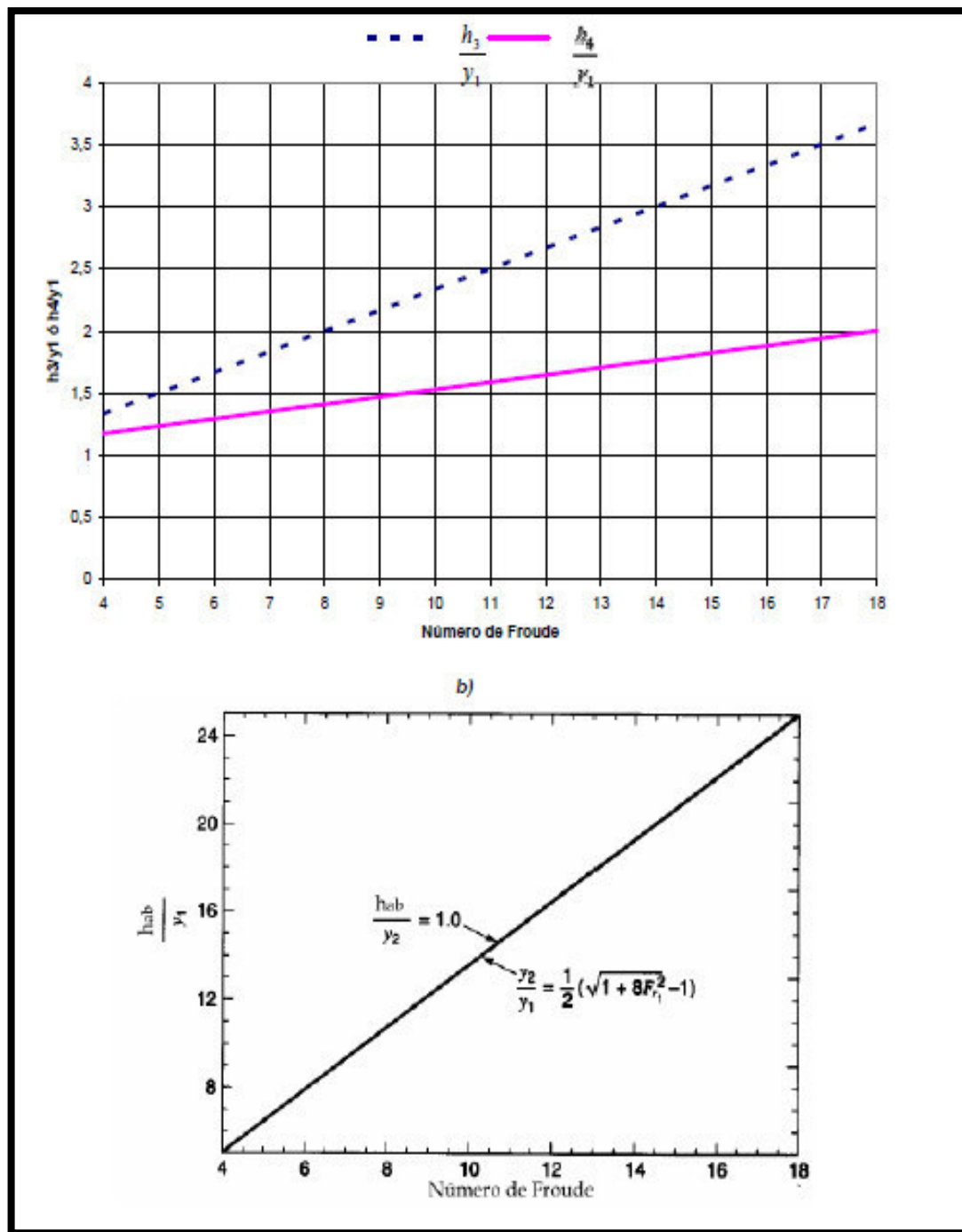


Figura 21. Curvas para hallar parámetros de un estanque amortiguador USBR Tipo III
Fuente: Bureau of Reclamation, 1981.

Estanque amortiguador USBR Tipo IV, cuando el número de Froude está comprendido entre 2.5 y 4.5, se producirá un resalto oscilante en el estanque amortiguador, el cual genera una onda que es difícil de atenuar. Se diseñan para combatir este problema eliminando la onda en su fuente. Esto se lleva a cabo intensificando el remolino, que aparece en la parte superior del resalto, con los chorros direccionales utilizando grandes bloques en la rápida, para un comportamiento hidráulico mejor es conveniente construir estos bloques más angostos que lo indicado, preferiblemente con un ancho igual a $0.75 y_1$, y fijar la profundidad de salida, de tal manera que sea un 5% a 10% mayor que la profundidad recuente del resalto. El estanque tipo IV se utiliza en las secciones rectangulares. (Bureau of Reclamation, 1981)

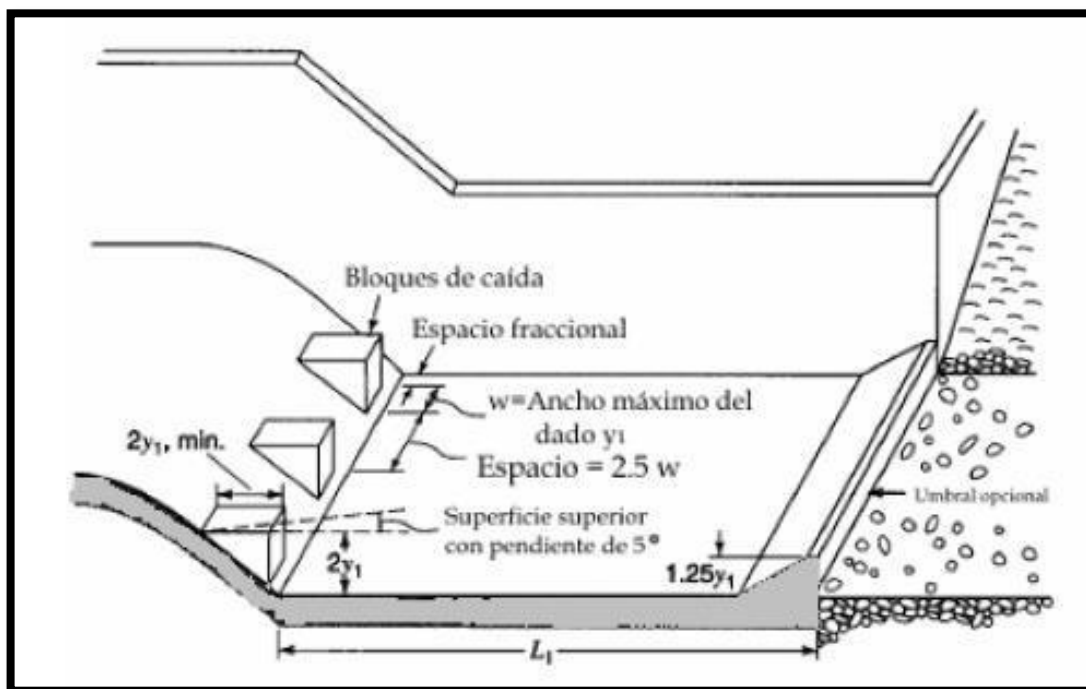


Figura 22. Estanque amortiguador USBR Tipo IV
Fuente: Bureau of Reclamation, 1981.

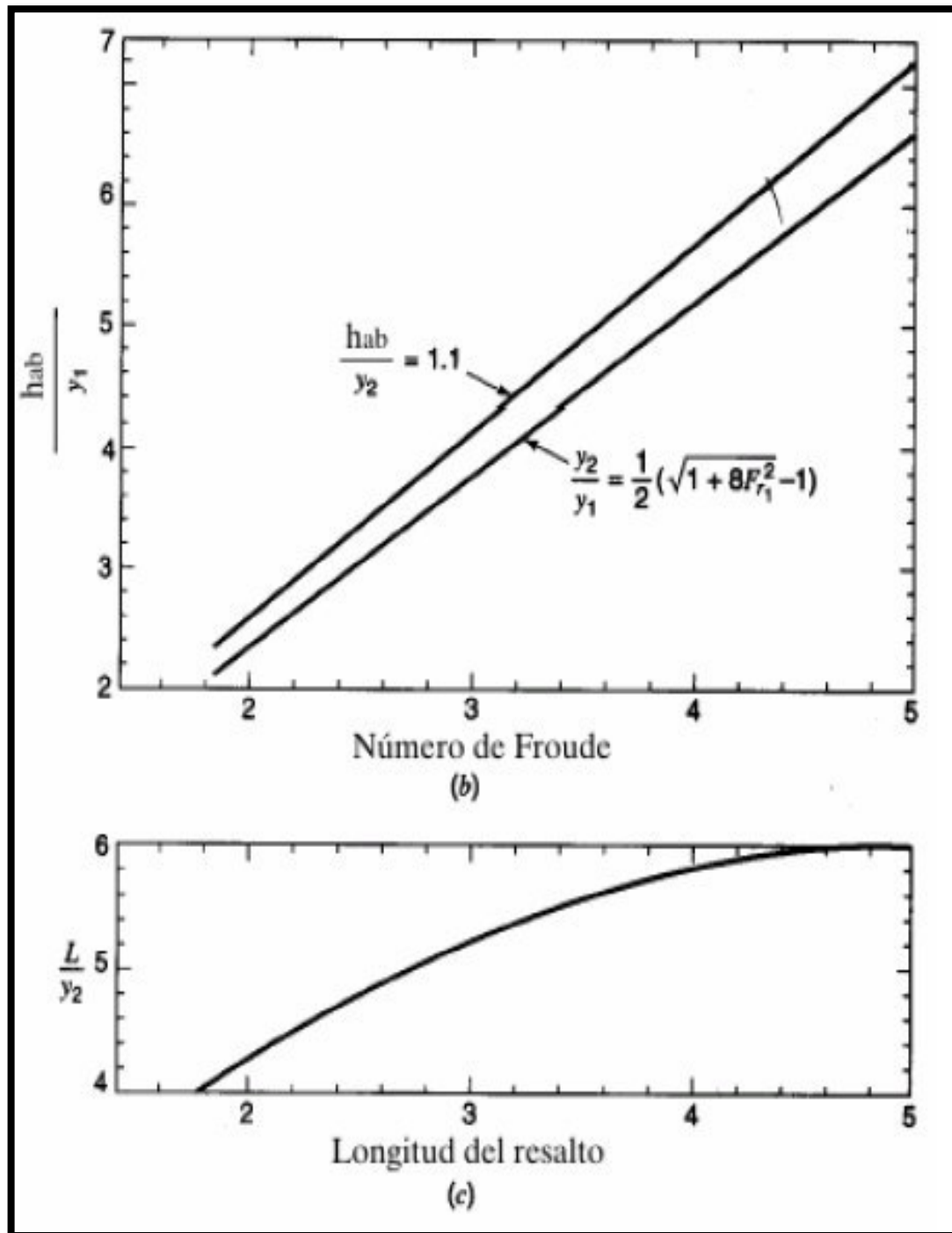


Figura 23. Curvas para hallar parámetros de un estanque amortiguador USBR Tipo IV
Fuente: Bureau of Reclamation, 1981.

Colchón Hidráulico SAF, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica St. Anthony Falls de la Universidad de Minnesota EE.UU. para su uso en pequeñas estructuras de drenaje. La utilización de este tipo de estructuras en sistemas de gran altura podría dar lugar a la generación de fenómenos como la cavitación. (Arbulú, 2012)

Las reglas de diseño resumidas por el investigador Blaisdell son las siguientes:

- a. La longitud del colchón disipador (Froude entre 1.7 y 17): (Arbulú, 2012)

$$L_B = 4.5 y_2 Fr_1^{-0.76} \quad (2.34)$$

- b. La altura de los bloques de entrada y los bloques del piso es y_1 y su ancho y espaciamiento es aproximadamente $0.75 y_1$. (Arbulú, 2012)

- c. La distancia desde el extremo de aguas arriba del colchón disipador hasta los bloques del piso es $\frac{L_B}{3}$. (Arbulú, 2012)

- d. No deben localizarse bloques en el piso más cerca de las paredes laterales que $\frac{3y_1}{8}$. (Arbulú, 2012)

- e. Los bloques del piso deben localizarse aguas abajo enfrentados a las aberturas entre los bloques de la rápida. (Arbulú, 2012)

- f. Los bloques del piso deben ocupar entre el 40% y el 55% del ancho del colchón disipador. (Arbulú, 2012)

- g. Debe utilizarse un muro cortina de profundidad nominal en el extremo del colchón disipador. (Arbulú, 2012)

h. Los anchos y el espaciamiento de los bloques del piso para cuencos disipadores divergentes deben incrementarse en proporción al aumento del ancho del colchón disipador en la sección dónde se localizan los bloques. (Arbulú, 2012)

i. La altura del umbral de salida está dada por $c = 0.07 y_2$, dónde y_2 es la altura conjugada teórica, correspondiente a y_1 . (Arbulú, 2012)

j. La profundidad de salida de aguas abajo por encima del piso del colchón disipador está dada por: (Arbulú, 2012)

$$y_2'' = \left(1.10 - \frac{Fr_1^2}{120} \right) y_2 \quad Fr_1 = 1.7 \text{ a } 5.5 \quad (2.35)$$

$$y_2'' = 0.85 y_2 \quad Fr_1 = 5.5 \text{ a } 11 \quad (2.36)$$

$$y_2'' = \left(1.00 - \frac{Fr_1^2}{800} \right) y_2 \quad Fr_1 = 11 \text{ a } 17 \quad (2.37)$$

k. La altura de los muros laterales por encima de la profundidad de salida máxima esperada dentro de la vida útil de la estructura está dada por $z = \frac{y_2}{3}$. (Arbulú, 2012)

l. Los muros de salida deben ser iguales en altura a los muros laterales del cuenco disipador, y su parte superior debe tener una pendiente de 1:1. (Arbulú, 2012)

m. El muro de salida debe localizarse con un ángulo de 45° con respecto al eje central de la salida. (Arbulú, 2012)

n. Los muros laterales del colchón disipador pueden ser paralelos o divergir como una extensión de los muros laterales de la transición. (Arbulú, 2012)

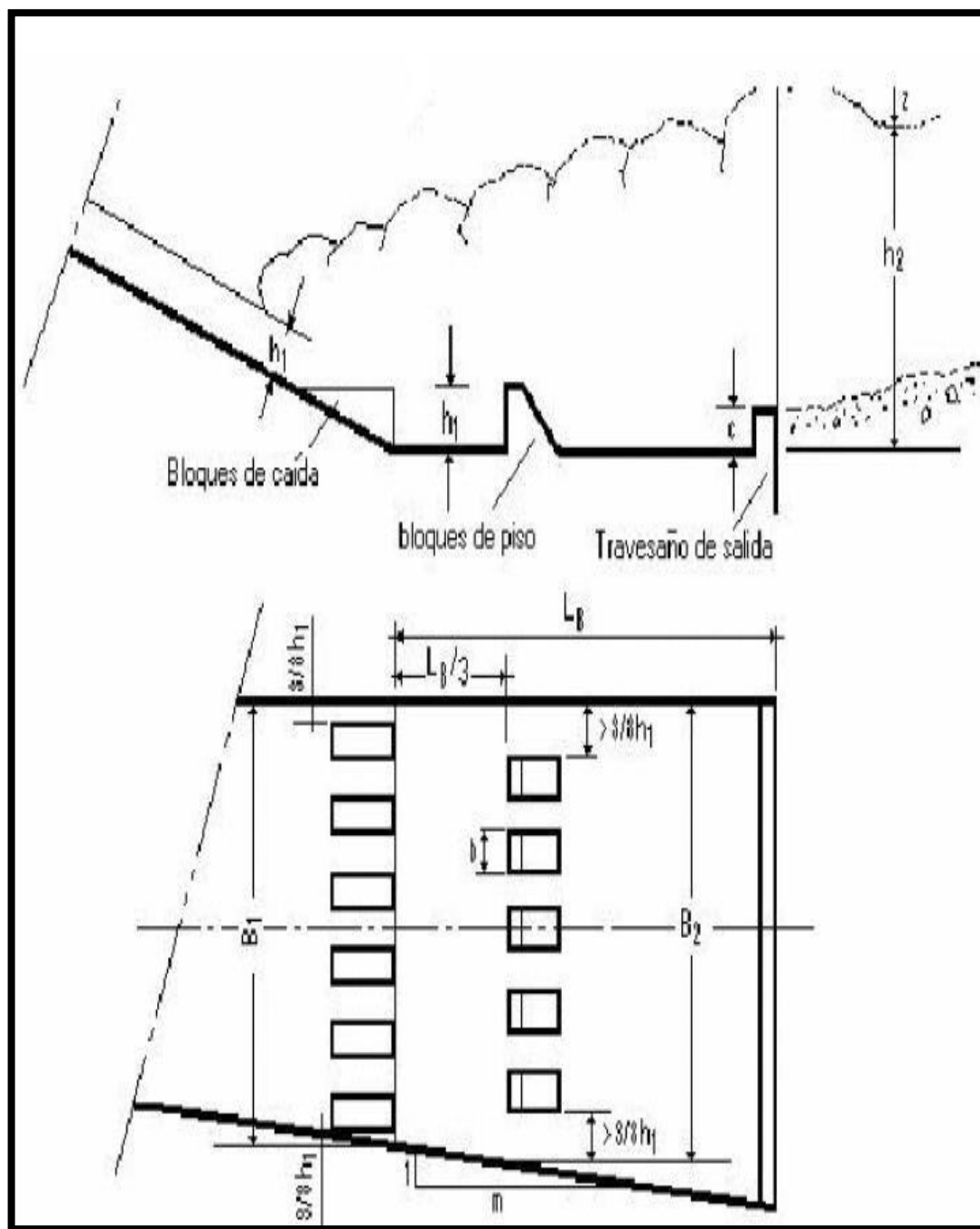


Figura 24. Colchón hidráulico SAF
Fuente: Arbulú, 2012.

Tabla 4. Condiciones y características de los disipadores de energía

Nombre	Aplicación práctica	Condiciones de flujo	Observaciones
USBR Tipo I	Canales	$Fr_1 < 1.7$ (hasta 2.5) Longitud del estanque = $4.2y_2$	Sin bloques o dispositivos de disipación.
USBR Tipo II	Estructuras grandes	$Fr_1 > 4.5$ $q < 46.5 \text{ m}^2/\text{s}$ $H_1 < 61 \text{ m}$ Longitud del estanque = $4.4y_2$	Dos hileras de bloques, la hilera final se combina con un umbral de salida inclinado (umbral dentado)
USBR Tipo III	Estructuras pequeñas	$Fr_1 > 4.5$ $q < 16.86 \text{ m}^2/\text{s}$ $V_1 < 15 \text{ m/s}$ Longitud del estanque = $2.8y_2$	Dos hileras de bloques y un umbral de salida.
USBR Tipo IV	Para resaltos oscilantes	$2.5 < Fr_1 < 4.5$ Longitud del estanque = $6.0y_2$	Una hilera de bloques y un umbral de salida, deben añadirse supresores de onda en la salida.
SAF	Estructuras pequeñas	$1.7 < Fr_1 < 17$ Long. estanque = $4.5y_2 Fr_1^{-0.76}$	Dos hileras de bloques y un umbral de salida.
USACE	Estructuras pequeñas	Longitud del estanque = $4.0y_2$	Dos hileras de bloques y un umbral de salida.

Fuente: Arbulú (2012).

2.3.6. Transición de salida

Cambia en forma gradual la sección del colchón para hacerla coincidir con las dimensionales del canal de salida. (Villón, 2005)

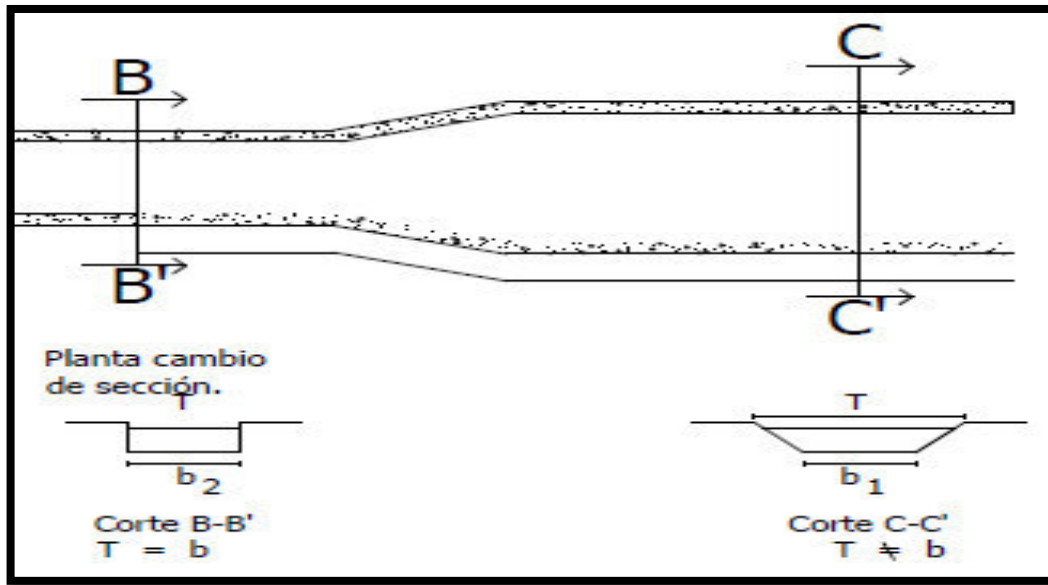


Figura 25. Vista de planta de una transición de salida
Fuente: Rodríguez, 2008.

La longitud de la transición de salida está dada por la ecuación (2.16) (Villón, 2005)

$$L_{\text{transición de salida}} = \frac{T_{\text{aguas abajo}} - T_{\text{disipador de energía}}}{2 \operatorname{tg} \alpha}$$

Dónde:

$L_{\text{transición de salida}}$ = longitud de la transición de salida (m)

$T_{\text{aguas abajo}}$ = espejo de agua en el canal aguas abajo (m)

$T_{\text{disipador de energía}}$ = espejo de agua a la salida del disipador de energía (m)

α = ángulo que forman los espejos de agua $T_{\text{aguas abajo}}$ y $T_{\text{disipador de energía}}$ ($^{\circ}$ sexagesimales)

2.3.7. Formación de Ondas

Las ondas en una rápida son objetables, porque ellas pueden sobrepasar los muros de la rápida y causar ondas en el dissipador de energía. (Rojas, 2013)

Una poza dissipadora no sería un dissipador de energía efectivo con este tipo de flujo porque no puede formarse un salto hidráulico estable. (Rojas, 2013)

Un flujo no estable y pulsátil puede producirse en rápidas largas con una fuerte pendiente. (Rojas, 2013)

Estas ondas generalmente se forman en rápidas, que son más largas que 60 metros aproximadamente, y tienen una pendiente de fondo más suave que 20. (Rojas, 2013)

La máxima altura de onda que puede esperarse es dos veces el tirante normal para la pendiente. (Rojas, 2013)

La capacidad máxima del flujo momentáneo inestable y pulsátil es 2 veces la capacidad normal. (Rojas, 2013)

Un flujo transversal u ondas cruzadas pueden también desarrollarse en una rápida y estas ondas son causadas por: (Rojas, 2013)

- a. Transiciones abruptas de una sección del canal a otra.
- b. Estructuras asimétricas
- c. Curvas o ángulos en el alineamiento de la rápida.

Algunas secciones de la rápida son más probables a sufrir ondas que otras secciones poco profundas y anchas parecen ser particularmente susceptibles a flujo transversal. (Rojas, 2013)

Mientras que secciones profundas y angostas resisten tanto el flujo transversal como el flujo inestable y pulsátil. (Palomino, 2014)

Si los cálculos indican que ocurrirá flujo inestable y pulsátil, el diseño puede ser modificado para reducir la probabilidad de que ondas sean generadas o la estructura puede ser adaptada para evitar el flujo inestable y pulsátil. (Palomino, 2014)

Posibles cambios de diseño incluyen: (Palomino, 2014)

- a. Dividir el flujo en la sección de la rápida con un muro en el centro de la rápida.
- b. Cambiar la forma de la sección.
- c. Reducir la longitud de la rápida. Una serie de rápidas más cortas o caídas.
- d. Haciendo más pronunciada la pendiente de la rápida.
- e. Reemplazando la rápida abierta con una rápida entubada.

Para evitar la formación de ondas para cada cambio de sección hecha en la entrada, en el tramo inclinado o disipador de energía se debe cumplir $\alpha'' > \alpha$. (Rojas, 2013)

El máximo ángulo de deflexión será: (Rojas, 2013)

$$\text{ctg} \alpha'' = 3.375 \bar{F} \quad (2.38)$$

Dónde:

\bar{F} = número de Froude promedio

α'' = ángulo de deflexión de la superficie de agua en el plano de planta (° sexagesimales)

α = ángulo que forman los espejos de agua en un cambio de sección (° sexagesimales)

CAPITULO 3 – DESARROLLO DEL TEMA

3.1. Condiciones iniciales

El coeficiente de rugosidad de Manning (n) asume el valor de $n = 0.014$ para calcular la altura de muros y un valor de $n = 0.010$ para el cálculo de niveles de energía.

Las transiciones de entrada y salida presentan un flujo subcrítico ($F_r < 1$), la sección de control ($F_r = 1$) y la rampa presenta un flujo supercrítico ($F_r > 1$).

Las transiciones hidráulicas se han calculado con los ángulos recomendados por la U.S.B.R. ($\alpha = 12.5^\circ$), ya que se consiguen pérdidas de carga mínima.

De la teoría de Ven Te Chow para las pérdidas por convergencia en la transición de entrada según la Tabla 3 se tiene que $C_i = 0.2$ para la ecuación (2.19).

En la sección de control se está considerando un vertedero de cresta delgada.

Para el tramo inclinado, la trayectoria y el dissipador de energía se está considerando un canal de sección rectangular que conserve el mismo ancho de solera.

En la ecuación (2.31) se tendrá que $S_{\text{tramo inclinado}}$ ($S_{\text{tramo inclinado}}$ es la pendiente del tramo inclinado) y la $v_{\text{max}} = 1.5 v_0$ (v_0 es la velocidad al inicio de la trayectoria).

La longitud del resalto hidráulico se calcula con la ecuación (2.15) y considerando un valor de $K = 5$ (debido a que el canal tiene sección rectangular).

El tramo inclinado después de la trayectoria tendrá un talud 2:1.

El dissipador de energía por seguridad se profundizará considerando un 40% de ahogamiento.

3.2. Datos iniciales

El canal rectangular (sección de control, tramo inclinado, trayectoria y dissipador de energía) tendrá un ancho de solera $b = 1.25$ m.

La sección de control tendrá una altura de vertedero de $P = 0.2$ m.

El canal aguas arriba y aguas abajo tiene una sección trapezoidal y sus datos se visualizan en la Tabla 5.

Tabla 5. Características hidráulicas del canal aguas arriba y canal aguas abajo

	Aguas Arriba	Aguas Abajo	Unidad	Descripción
Q	2.250	2.250	m ³ /s	Caudal
b	0.700	0.700	m	Base
n	0.014	0.014	-	Rugosidad
z	1.000	1.000	-	Talud
S	0.0030	0.0030	-	Pendiente
y	0.749	0.749	m	Tirante
V	2.071	2.071	m/s	Velocidad
T	2.198	2.198	m	Espejo de agua
A	1.086	1.086	m ²	Área hidráulica
P	2.820	2.820	m	Perímetro hidráulico
g	9.81	9.81	m/seg ²	Gravedad
cota	305.470	301.040	msnm	Elevación

Fuente: Comisión de Regantes del Sub Sector de Riego Huayto (2017).

3.3. Metodología de cálculo

3.3.1. Canal aguas arriba y canal aguas abajo

Los parámetros de ambos canales se muestran en la Tabla 5.

El borde libre se hallará con la Tabla 6.

3.3.2. Transición de entrada

Hallar la longitud utilizando la ecuación (2.16).

Verificar la formación de ondas utilizando la ecuación (2.38).

3.3.3. Sección de control

Utilizaremos la ecuación (2.21)

3.3.4. Tramo inclinado

Para el cálculo de cota en la sección de control realizaremos un balance de energía entre el punto 1 (cota 1) y el punto 2 (sección de control).

Sabiendo la cota 2 le restaremos el desnivel que se presenta en el tramo inclinado para obtener como resultado la cota 3.

La pendiente del tramo inclinado hallaremos dividiendo el desnivel (cota 3 - cota 2) entre la longitud horizontal del tramo inclinado.

Para hallar los tirantes en el tramo inclinado usaremos la ecuación (2.29), donde el coeficiente de rugosidad de Manning “n” tomara un valor de 0.010.

El borde libre en el tramo inclinado se hallará con la ecuación (2.30).

3.3.5. Trayectoria

Se tendrá la ecuación (2.31) para $tg\theta = S_{\text{tramo inclinado}}$ y $v_{\text{max}} = 1.5 v_0$, donde

$S_{\text{tramo inclinado}}$ es la pendiente y v_0 la velocidad inicial de la trayectoria.

3.3.6. Disipador de energía

Las condiciones de llegada se calculan con la energía total en la última sección de la rápida (Curva 1: elevación de la trayectoria vs tirante conjugado menor).

Las condiciones de salida del disipador están definidas por la energía de la primera sección del canal aguas abajo (Curva 2: elevación de fondo del disipador de energía vs tirante conjugado menor).

La intersección de la Curva 1 y Curva 2 nos da la cota del disipador de energía y el tirante conjugado menor, el tirante conjugado mayor se obtiene con la ecuación (2.8).

A la profundidad hallada se le considerará un 40% de ahogamiento para dar una seguridad de funcionamiento (se tendrá que profundizar la cota de fondo calculada).

La selección del disipador de energía y sus parámetros lo hallaremos ubicando las condiciones del flujo en la Tabla 4.

El borde libre de la poza se hallará con la curva que aparece en la Figura 35.

3.3.7. Transición de salida

Hallar la longitud utilizando la ecuación (2.16).

Verificar la formación de ondas utilizando la ecuación (2.38).

3.4. Cálculos de ingeniería

3.4.1. Cálculo de altura del muro aguas arriba

Está definido $H_1 = y_{\text{aguas arriba}} + b.l_{\text{aguas arriba}}$

Dónde:

H_1 = altura del muro aguas arriba (m).

$y_{\text{aguas arriba}}$ = tirante aguas arriba (m). = 0.749m (dato de la Tabla 5)

$b.l_{\text{aguas arriba}}$ = borle libre del canal aguas arriba (m).

Para hallar el $b.l_{\text{aguas arriba}}$ usaremos la Tabla 6

Tabla 6. Borde libre para canales en función a su caudal

Caudal (m ³ /s)	Canal revestido (m)	Canal sin revestir (m)
Menor o igual a 0.05	0.075	0.10
0.05 – 0.25	0.10	0.20
0.25 – 0.50	0.20	0.40
0.50 – 1.00	0.25	0.50
Mayor que 1	0.30	0.60

Fuente: Villón (2007).

De la Tabla 6:

Para:

Canal revestido

$$Q = 2.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

Obtenemos:

$$b.l._{\text{aguas arriba}} = 0.30 \text{ m}$$

Reemplazando en la ecuación

$$H_1 = y_{\text{aguas arriba}} + b.l._{\text{aguas arriba}}$$

Para:

$$y_{\text{aguas arriba}} = 0.749 \text{ m}$$

$$b.l._{\text{aguas arriba}} = 0.30 \text{ m}$$

Obtenemos:

$$H_1 = 1.049 \text{ m}$$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$$H_1 = 1.10 \text{ m}$$

3.4.2. Cálculo de longitud de la transición de entrada

De la ecuación (2.16) $L_{\text{transicion de entrada}} = \frac{T_1 - T_c}{2 \operatorname{tg} \alpha}$

Dónde:

$L_{\text{transicion de entrada}}$ = longitud de la transición de entrada (m)

T_1 = espejo de agua en el canal aguas arriba (m)

T_c = espejo de agua en la sección de control (m)

α = ángulo que forman los espejos de agua T_1 y T_c ($^{\circ}$ sexagesimales)

Para:

$T_1 = 2.198\text{m}$ (dato de la Tabla 5)

$T_c = 1.25\text{m}$ (datos iniciales donde $T_c = b$ = ancho de solera de la sección de control)

$\alpha = 12.5^{\circ}$ (ángulo recomendado por la USBR, se indica en condiciones iniciales)

Obtenemos:

$L_{\text{transicion de entrada}} = 2.138\text{m}$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$L_{\text{transicion de entrada}} = 2.15\text{m}$

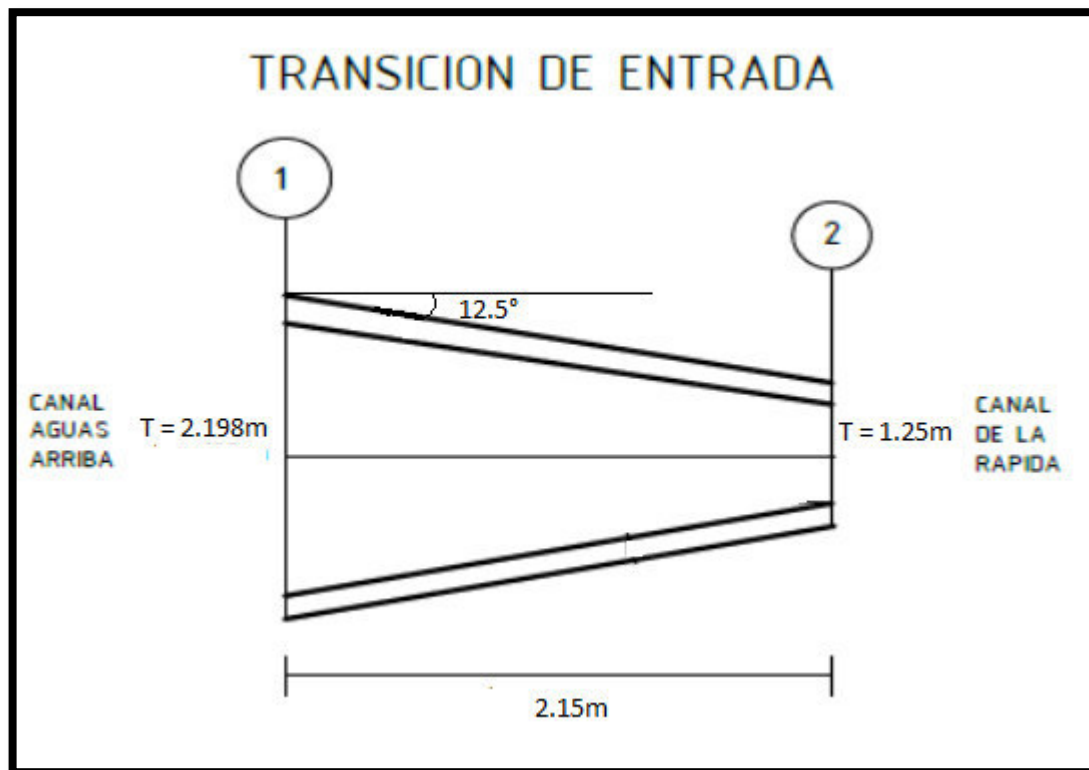


Figura 26. Parámetros de la transición de entrada
Fuente: Autoría propia, 2018

3.4.3. Cálculo de la sección de control (vertedero de cresta delgada)

a. Cálculo del tirante crítico en la sección de control

La sección de control es rectangular y su base es igual al ancho de solera del tramo inclinado.

De la ecuación (2.7)
$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Dónde:

$$q = \frac{Q}{b} = \text{caudal unitario (m}^2/\text{s)}$$

$$Q = 2.25 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (dato de la Tabla 5)}$$

$$b = 1.25 \text{ m (valor de datos iniciales, } b = \text{ancho de solera de la sección de control)}$$

$$g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$$

Obtenemos:

$$y_c = 0.691 \text{ m}$$

b. Cálculo de la velocidad crítica en la sección de control

En la sección de control por tener condiciones críticas se tiene $F_{\text{seccion de control}} = 1$

Dónde:

$F_{\text{seccion de control}}$ = número de Froude en la sección de control

Entonces de la ecuación (2.1) $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$

En la sección de control:

$$F_{\text{seccion de control}} = \frac{V_c}{\sqrt{gy_c}}$$

Se tendrá:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gy_c}} = 1$$

Es decir se cumple:

$$V_c = \sqrt{gy_c}$$

Dónde:

V_c = velocidad crítica en la sección de control (m/s)

$$y_c = 0.691\text{m}$$

$$g = 9.81\text{m}^2/\text{s}$$

Obtenemos:

$$V_c = 2.604\text{m/s}$$

c. Cálculo de la cota 2 (sección de control)

Haciendo un balance de energía (en la cota 1 y la sección de control)

$$E_{\text{cota1}} = E_{\text{seccion de control}} + C_i \Delta h_v + \Delta h_f$$

Dónde:

$$E_{\text{cota1}} = \text{cota1} + y_{\text{cota1}} + h_{v_{\text{cota1}}}$$

$$\text{cota 1} = 305.470\text{m (dato de la Tabla 5)}$$

$$y_{\text{cota1}} = y_{\text{aguas arriba}} = 0.749\text{m (dato de la Tabla 5)}$$

$$h_{v_{\text{cota1}}} = \frac{V_{\text{cota1}}^2}{2g} = 0.219\text{m (donde } V_{\text{cota1}} = V_{\text{aguas arriba}} = 2.071\text{m/s es dato de la Tabla 5)}$$

Obtenemos:

$$E_{\text{cota1}} = 306.438\text{m}$$

De la ecuación (2.19) $h_c = C_i \Delta h_v$ que representa las pérdidas por convergencia:

$$C_i = 0.2 \text{ (dato de la Tabla 3)}$$

$$\Delta h_v = \frac{V_c^2}{2g} - \frac{V_{\text{cota1}}^2}{2g} \text{ (ecuación (2.20))}$$

Dónde:

$$\Delta h_v = \frac{(2.604\text{m/s})^2}{2(9.81\text{m}^2/\text{s})} - \frac{(2.071\text{m/s})^2}{2(9.81\text{m}^2/\text{s})} = 0.127\text{m}$$

Reemplazando en la ecuación (2.19):

$$h_c = C_i \Delta h_v = (0.2)(0.127\text{m})$$

$$h_c = 0.025\text{m}$$

De la ecuación (2.17) $\Delta h_f = S_E L_{\text{transicion de entrada}}$ representa las pérdidas por fricción:

$L_{\text{transicion de entrada}}$ = longitud de la transición de entrada (m)

$$S_E = \text{pendiente promedio de fricción en la transición de entrada} = \frac{S_{\text{cotal}} + S_c}{2}$$

S_{cotal} = pendiente en la cota 1

$$S_c = \text{pendiente crítica} = S_c = \left(\frac{nV_c}{R_c^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = \text{ecuación de Manning}$$

$$R_c = \text{radio hidráulico (condición crítica)} = \frac{\text{área mojada}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{by_c}{b + 2y_c} \text{ (m)}$$

Tenemos:

$$L_{\text{transicion de entrada}} = 2.15\text{m}$$

$$S_{\text{aguas arriba}} = 0.0030 \text{ (dato de la Tabla 5)}$$

$$n = 0.010 \text{ (valor indicado en condiciones iniciales) = coeficiente de Manning}$$

Además:

$$R_c = \frac{by_c}{b + 2y_c} = \frac{(1.25\text{m})(0.691\text{m})}{1.25\text{m} + 2(0.691\text{m})} = 0.328\text{m} \text{ (condición de flujo crítico)}$$

$$S_c = \left(\frac{nV_c}{R_c^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = \left(\frac{(0.010)(2.604\text{m/s})}{(0.328)^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 0.0030 \text{ (condición de flujo crítico)}$$

$$S_E = \frac{S_{\text{cota1}} + S_c}{2} = \frac{0.003 + 0.003}{2} = 0.003 \text{ (pendiente promedio de fricción)}$$

Reemplazando en la ecuación (2.17):

$$\Delta h_f = S_E L_{\text{transición de entrada}} = (0.003)(2.15\text{m}) = 0.006\text{m}$$

Obtenemos:

$$\Delta h_f = 0.006\text{m}$$

De la ecuación $E_{\text{sección de control}} = \text{cota}_{\text{sección de control}} + y_c + \frac{V_c^2}{2g}$

Dónde:

$$\text{cota}_{\text{sección de control}} = \text{cota 2 (condición de flujo crítico)}$$

$$y_c = 0.691\text{m (donde } y_c = \text{tirante crítico)}$$

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{(2.604\text{m/s})^2}{2(9.81\text{m}^2/\text{s}^2)} = 0.346\text{m (donde } V_c = \text{velocidad crítica)}$$

Reemplazando en la ecuación $E_{\text{aguas arriba}} = E_{\text{sección de control}} + C_i \Delta h_v + \Delta h_f$

$$E_{\text{cota1}} = 306.438\text{m}$$

$$E_{\text{sección de control}} = \text{cota 2} + 1.037\text{m}$$

$$h_c = 0.025\text{m}$$

$$\Delta h_f = 0.006\text{m}$$

$$306.438\text{m} = \text{cota 2} + 1.037\text{m} + 0.025\text{m} + 0.006\text{m}$$

Obtenemos:

cota 2 = 305.370m

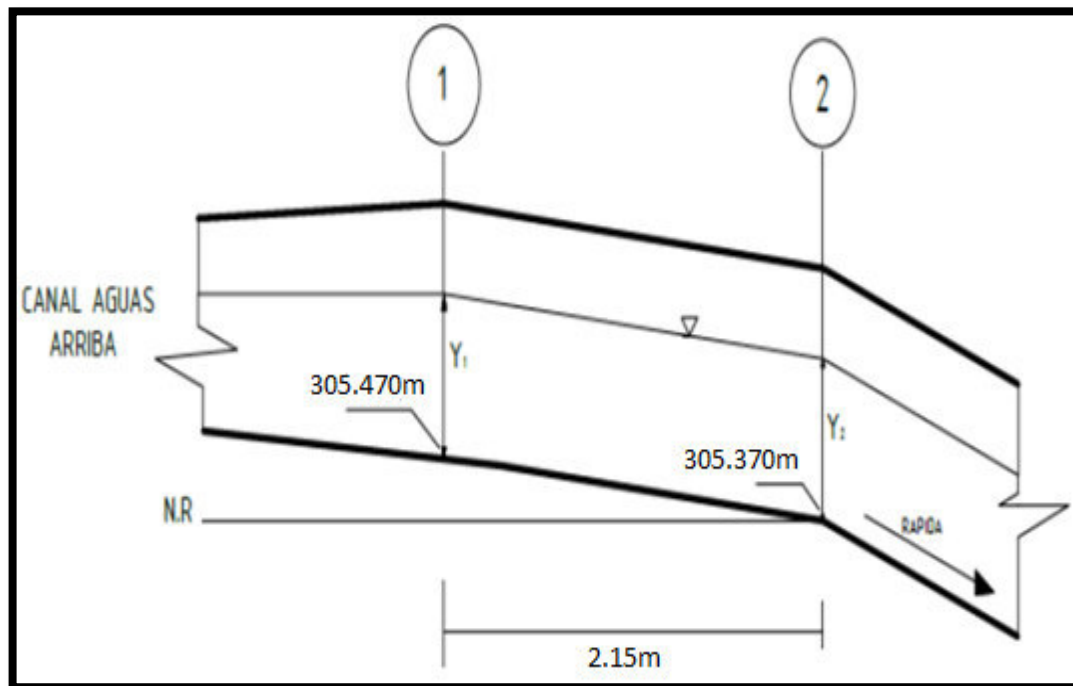


Figura 27. Cotas de la sección 1 (aguas arriba) y la sección 2 (sección de control)
Fuente: Autoría propia, 2018.

d. Cálculo del espesor del vertedero en la sección de control

Para dimensionar el vertedero en la sección de control tendemos en cuenta:

$P = 0.2\text{m}$ (altura del vertedero, indicado en condiciones iniciales)

$b = 1.25\text{m}$ (ancho de solera del vertedero, indicado en condiciones iniciales)

Dónde:

b = ancho de solera del vertedero = ancho de solera del tramo inclinado

Para un vertedero de cresta delgada y sección rectangular de (2.21):

$$b_0 < \frac{2}{3}h$$

Dónde:

b_0 = espesor de la cresta

H = carga sobre el vertedero = $y_{\text{aguas arriba}}$

Se debe cumplir que:

$$b_o < 0.499m$$

Consideraremos el valor de:

$$b_o = 0.2m$$

Entonces el vertedero tendrá:

$P = 0.2m$ (altura del vertedero)

$b = 1.25m$ (ancho de solera del vertedero)

$b_o = 0.2m$ (espesor del vertedero)

3.4.4. Cálculo para verificar la formación de ondas en la entrada

Para descartar la formación de ondas debe cumplir la relación de $\alpha'' > \alpha$

Dónde:

$$ctg\alpha'' = 3.375\bar{F}$$

$$\bar{F} = \frac{F_{\text{cota1}} + F_{\text{seccion de control}}}{2}$$

F_{cota1} = número de Froude en la cota 1

$F_{\text{seccion de control}}$ = número de Froude en la sección de control

Además:

$$tg\theta = \frac{\text{cota1}-\text{cota}_{\text{seccion de control}}}{L_{\text{transicion de entrada}}}$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{(1-K)yg \cos \theta}}$$

Dónde:

$$tg\theta = \frac{305.470\text{m} - 305.370\text{m}}{2.15\text{m}} = 0.0465$$

$$\theta = 2.66^\circ$$

Para $K = 0$ (para el piso de la transición en un plano)

$$F_{\text{cota1}} = 0.764$$

$$F_{\text{seccion de control}} = 1 \text{ (condiciones críticas en la sección de control)}$$

Obtenemos:

$$\overline{F} = 0.882$$

Tendremos:

$$\operatorname{ctg} \alpha'' = 3.375 \overline{F} = (3.375)(0.882) = 2.977$$

$$\alpha'' = 18.57^\circ$$

No se forman ondas en la transición de entrada ya que $(\alpha'' = 18.57^\circ) > (\alpha = 12.5^\circ)$.

3.4.5. Cálculo de altura del muro del tramo inclinado

Está definido por:

$$H_2 = y_{1(\text{tramo inclinado})} + b.l._{\text{tramo inclinado}}$$

Dónde:

H_2 = altura del muro del tramo inclinado (m)

$y_{1(\text{tramo inclinado})}$ = primer tirante del tramo inclinado (m)

$b.l._{\text{tramo inclinado}}$ = borde libre del tramo inclinado (m)

a. Cálculo de la cota 3 (punto final de tramo inclinado)

Se tiene que el desnivel $\Delta h = \text{cota 2} - \text{cota 3}$

Dónde:

$$\Delta h = 3.48\text{m (desnivel del tramo inclinado)}$$

$$\text{cota 2} = 305.370\text{m (punto inicial del tramo inclinado)}$$

$$\text{cota 3} = 305.370\text{m} - 3.48\text{m}$$

Obtenemos:

$$\text{cota 3} = 301.890\text{m (punto final del tramo inclinado)}$$

b. Cálculo de la pendiente del tramo inclinado

Se tiene que $S_{\text{tramo inclinado}} = \text{tg}\theta$

Dónde:

$$\text{tg}\theta = \frac{\text{desnivel del tramo inclinado}}{\text{longitud horizontal del tramo inclinado}} = \frac{3.48}{50}$$

Obtenemos:

$$S_{\text{tramo inclinado}} = 0.0696$$

c. Cálculo de tirantes en el tramo inclinado

De la ecuación $E_a + \Delta Z = E_{a+1} + \Delta h_f$

Dónde:

$$E_a = y_a + \frac{V_a^2}{2g} = \text{energía específica en el punto } a \text{ (m)}$$

y_a = tirante en el punto a (m)

$$\frac{V_a^2}{2g} = \text{altura de la velocidad en el punto } a \text{ (m)}$$

$$E_{a+1} = y_{a+1} + \frac{V_{a+1}^2}{2g} = \text{energía específica en el punto } a+1 \text{ (m)}$$

y_{a+1} = tirante en el punto $a+1$ (m)

$$\frac{V_{a+1}^2}{2g} = \text{altura de la velocidad en el punto } a+1 \text{ (m)}$$

ΔZ = desnivel entre el punto a y $a+1$ del tramo inclinado (m)

$\Delta h_f = S_a L_i$ = pérdidas por fricción del tramo inclinado entre el punto a y $a+1$ (m)

$$L_i = \Delta L \sqrt{1 + S_{\text{tramo inclinado}}^2} = \text{longitud del tramo inclinado entre el punto } a \text{ y } a+1 \text{ (m)}$$

$$S_a = \left(\frac{n V_a}{R_a^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = \text{pendiente de fricción entre el punto } a \text{ y } a+1 \text{ del tramo inclinado}$$

$$R_a = \frac{b y_a}{b + 2 y_a} = \text{radio hidráulico en el punto } a \text{ del tramo inclinado (m)}$$

$$\Delta L = \frac{\text{longitud horizontal del tramo inclinado}}{\text{número de tramos}} \text{ (m)}$$

Tenemos:

$$S_{\text{tramo inclinado}} = 0.0696$$

$$Q = 2.25 \text{ m}^3/\text{s} = \text{constante}$$

$$b = 1.25 \text{ m} = \text{ancho de solera constante en el tramo inclinado}$$

Sección del canal: rectangular (indicado en condiciones iniciales)

$$A = by \text{ (área de la sección del canal en el tramo inclinado)}$$

Considerando:

$$\text{número de tramos} = 10 \text{ (valor aleatorio)}$$

Tendremos:

$$\Delta Z = \frac{\text{desnivel del tramo inclinado}}{\text{número de tramos}} = \frac{3.48}{10}$$

$$\Delta Z = 0.348 \text{ m}$$

$$\Delta L = \frac{\text{longitud horizontal del tramo inclinado}}{\text{número de tramos del tramo inclinado}} = \frac{50}{10} = 5 \text{ m}$$

$$L_t = \Delta L \sqrt{1 + S_{\text{tramo inclinado}}^2} = (5 \text{ m}) \sqrt{1 + 0.0696^2} = 5.012 \text{ m}$$

$$n = 0.010 \text{ (valor indicado en condiciones iniciales) = coeficiente de Manning}$$

Con los valores obtenidos y las relaciones dadas obtendremos las siguientes tablas del Teorema de Bernoulli por tramos finitos:

Tabla 7. Valores obtenidos por tramos finitos (y = 0.10m hasta y = 0.19m)

y	$A = by$	$P = 2y + b$	$R = \frac{A}{P}$	$R^{\frac{2}{3}}$	V	$\frac{V^2}{2g}$	$E = y + \frac{V^2}{2g}$	$\Delta h_f = L_i \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$	$E + \Delta h_f$
(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ^{2/3})	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.100	0.125	1.450	0.086	0.195	18.000	16.514	16.614	4.264	20.878
0.110	0.138	1.470	0.094	0.206	16.364	13.648	13.758	3.161	16.918
0.120	0.150	1.490	0.101	0.216	15.000	11.468	11.588	2.408	13.996
0.130	0.163	1.510	0.108	0.226	13.846	9.771	9.901	1.877	11.779
0.140	0.175	1.530	0.114	0.236	12.857	8.425	8.565	1.492	10.058
0.150	0.188	1.550	0.121	0.245	12.000	7.339	7.489	1.206	8.696
0.160	0.200	1.570	0.127	0.253	11.250	6.451	6.611	0.990	7.600
0.170	0.213	1.590	0.134	0.261	10.588	5.714	5.884	0.822	6.706
0.180	0.225	1.610	0.140	0.269	10.000	5.097	5.277	0.691	5.968
0.190	0.238	1.630	0.146	0.277	9.474	4.574	4.764	0.587	5.351

Autoría propia, 2018.

Tabla 8. Valores obtenidos por tramos finitos (y = 0.20m hasta y = 0.29m)

y	$A = by$	$P = 2y + b$	$R = \frac{A}{P}$	$R^{\frac{2}{3}}$	V	$\frac{V^2}{2g}$	$E = y + \frac{V^2}{2g}$	$\Delta h_f = L_i \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$	$E + \Delta h_f$
(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ^{2/3})	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.200	0.250	1.650	0.152	0.284	9.000	4.128	4.328	0.503	4.831
0.210	0.263	1.670	0.157	0.291	8.571	3.745	3.955	0.434	4.389
0.220	0.275	1.690	0.163	0.298	8.182	3.412	3.632	0.378	4.010
0.230	0.288	1.710	0.168	0.305	7.826	3.122	3.352	0.331	3.683
0.240	0.300	1.730	0.173	0.311	7.500	2.867	3.107	0.292	3.399
0.250	0.313	1.750	0.179	0.317	7.200	2.642	2.892	0.258	3.151
0.260	0.325	1.770	0.184	0.323	6.923	2.443	2.703	0.230	2.933
0.270	0.338	1.790	0.189	0.329	6.667	2.265	2.535	0.206	2.741
0.280	0.350	1.811	0.194	0.335	6.422	2.102	2.382	0.185	2.567
0.290	0.363	1.830	0.198	0.340	6.207	1.964	2.254	0.167	2.421

Autoría propia, 2018.

Tabla 9. Valores obtenidos por tramos finitos (y = 0.30m hasta y = 0.39m)

y	$A = by$	$P = 2y + b$	$R = \frac{A}{P}$	$R^{\frac{2}{3}}$	V	$\frac{V^2}{2g}$	$E = y + \frac{V^2}{2g}$	$\Delta h_f = L_i \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$	$E + \Delta h_f$
(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ^{2/3})	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.300	0.375	1.850	0.203	0.345	6.000	1.835	2.135	0.152	2.286
0.310	0.388	1.870	0.207	0.350	5.806	1.718	2.028	0.138	2.166
0.320	0.400	1.890	0.212	0.355	5.625	1.613	1.933	0.126	2.058
0.330	0.413	1.910	0.216	0.360	5.455	1.516	1.846	0.115	1.961
0.340	0.425	1.930	0.220	0.365	5.294	1.429	1.769	0.106	1.874
0.350	0.438	1.950	0.224	0.369	5.143	1.348	1.698	0.097	1.795
0.360	0.450	1.970	0.228	0.374	5.000	1.274	1.634	0.090	1.724
0.370	0.463	1.990	0.232	0.378	4.865	1.206	1.576	0.083	1.659
0.380	0.475	2.010	0.236	0.382	4.737	1.144	1.524	0.077	1.601
0.390	0.488	2.030	0.240	0.386	4.615	1.086	1.476	0.072	1.547

Autoría propia, 2018.

Tabla 10. Valores obtenidos por tramos finitos (y = 0.40m hasta y = 0.49m)

y	$A = by$	$P = 2y + b$	$R = \frac{A}{P}$	$R^{\frac{2}{3}}$	V	$\frac{V^2}{2g}$	$E = y + \frac{V^2}{2g}$	$\Delta h_f = L_i \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$	$E + \Delta h_f$
(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ^{2/3})	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.400	0.500	2.050	0.244	0.390	4.500	1.032	1.432	0.067	1.499
0.410	0.513	2.070	0.248	0.394	4.390	0.982	1.392	0.062	1.455
0.420	0.525	2.090	0.251	0.398	4.286	0.936	1.356	0.058	1.414
0.430	0.538	2.110	0.255	0.402	4.186	0.893	1.323	0.054	1.378
0.440	0.550	2.130	0.258	0.405	4.091	0.853	1.293	0.051	1.344
0.450	0.563	2.150	0.262	0.409	4.000	0.815	1.265	0.048	1.313
0.460	0.575	2.170	0.265	0.413	3.913	0.780	1.240	0.045	1.286
0.470	0.588	2.190	0.268	0.416	3.830	0.748	1.218	0.042	1.260
0.480	0.600	2.210	0.271	0.419	3.750	0.717	1.197	0.040	1.237
0.490	0.613	2.230	0.275	0.423	3.673	0.688	1.178	0.038	1.216

Autoría propia, 2018.

Tabla 11. Valores obtenidos por tramos finitos (y = 0.50m hasta y = 0.59m)

y	$A = by$	$P = 2y + b$	$R = \frac{A}{P}$	$R^{\frac{2}{3}}$	V	$\frac{V^2}{2g}$	$E = y + \frac{V^2}{2g}$	$\Delta h_f = L_i \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$	$E + \Delta h_f$
(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ^{2/3})	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.500	0.625	2.250	0.278	0.426	3.600	0.661	1.161	0.036	1.196
0.510	0.638	2.270	0.281	0.429	3.529	0.635	1.145	0.034	1.179
0.520	0.650	2.290	0.284	0.432	3.462	0.611	1.131	0.032	1.163
0.530	0.663	2.310	0.287	0.435	3.396	0.588	1.118	0.031	1.148
0.540	0.675	2.330	0.290	0.438	3.333	0.566	1.106	0.029	1.135
0.550	0.688	2.350	0.293	0.441	3.273	0.546	1.096	0.028	1.124
0.560	0.700	2.370	0.295	0.444	3.214	0.527	1.087	0.026	1.113
0.570	0.713	2.390	0.298	0.446	3.158	0.508	1.078	0.025	1.103
0.580	0.725	2.410	0.301	0.449	3.103	0.491	1.071	0.024	1.095
0.590	0.738	2.430	0.303	0.452	3.051	0.474	1.064	0.023	1.087

Autoría propia, 2018.

Tabla 12. Valores obtenidos por tramos finitos (y = 0.60m hasta y = 0.691m)

y	$A = by$	$P = 2y + b$	$R = \frac{A}{P}$	$R^{\frac{2}{3}}$	V	$\frac{V^2}{2g}$	$E = y + \frac{V^2}{2g}$	$\Delta h_f = L_i \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$	$E + \Delta h_f$
(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ^{2/3})	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.600	0.750	2.450	0.306	0.454	3.000	0.459	1.059	0.022	1.081
0.610	0.763	2.470	0.309	0.457	2.951	0.444	1.054	0.021	1.075
0.620	0.775	2.490	0.311	0.459	2.903	0.430	1.050	0.020	1.070
0.630	0.788	2.510	0.314	0.462	2.857	0.416	1.046	0.019	1.065
0.640	0.800	2.530	0.316	0.464	2.813	0.403	1.043	0.018	1.062
0.650	0.813	2.550	0.319	0.467	2.769	0.391	1.041	0.018	1.059
0.660	0.825	2.570	0.321	0.469	2.727	0.379	1.039	0.017	1.056
0.670	0.838	2.590	0.323	0.471	2.687	0.368	1.038	0.016	1.054
0.680	0.850	2.610	0.326	0.473	2.647	0.357	1.037	0.016	1.053
0.691	0.864	2.632	0.328	0.476	2.604	0.346	1.037	0.015	1.052

Autoría propia, 2018.

Resolviendo la ecuación $E_a + \Delta Z = E_{a+1} + \Delta h_f$

Para $a = 0$, se cumple que el punto 0 es la sección de control (condiciones críticas)

$$E_0 + \Delta Z = E_1 + \Delta h_f$$

$$y_0 + \frac{V_0^2}{2g} + \Delta Z = y_c + \frac{V_c^2}{2g} + \Delta Z = y_{1(\text{tramo inclinado})} + \frac{V_{1(\text{tramo inclinado})}^2}{2g} + \Delta h_f$$

Donde

$$y_c = 0.691\text{m} = \text{tirante crítico}$$

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{(2.604\text{m/s})^2}{2(9.81\text{m}^2/\text{s}^2)} \quad (\text{donde } V_c = \text{velocidad crítica}) = 0.346\text{m}$$

$$y_1 = y_{1(\text{tramo inclinado})} = \text{primer tirante del tramo inclinado (m)}$$

$$\frac{V_{1(\text{tramo inclinado})}^2}{2g} = \text{altura de la velocidad del primer punto en el tramo inclinado (m)}$$

La ecuación $y_c + \frac{V_c^2}{2g} + \Delta Z = y_{1(\text{tramo inclinado})} + \frac{V_{1(\text{tramo inclinado})}^2}{2g} + \Delta h_f$ se tendrá que resolver

graficando las curvas E y $E + \Delta h_f$.

Los valores para graficar las curvas E y $E + \Delta h_f$ serán los obtenidos de las tablas del Teorema de Bernoulli por tramos finitos.

Para resolver la ecuación $y_c + \frac{V_c^2}{2g} + \Delta Z = y_{1(\text{tramo inclinado})} + \frac{V_{1(\text{tramo inclinado})}^2}{2g} + \Delta h_f$ de manera

gráfica primero se ubica el tirante del crítico $y_c = 0.691\text{m}$ en el eje de las abscisas, se

intercepta la curva E y se agrega $\Delta Z = 0.348\text{m}$, con esta altura se intercepta la curva

$E + \Delta h_f$ y se baja al eje de las abscisas obteniéndose y_1 (primer tirante del tramo

inclin

ado)

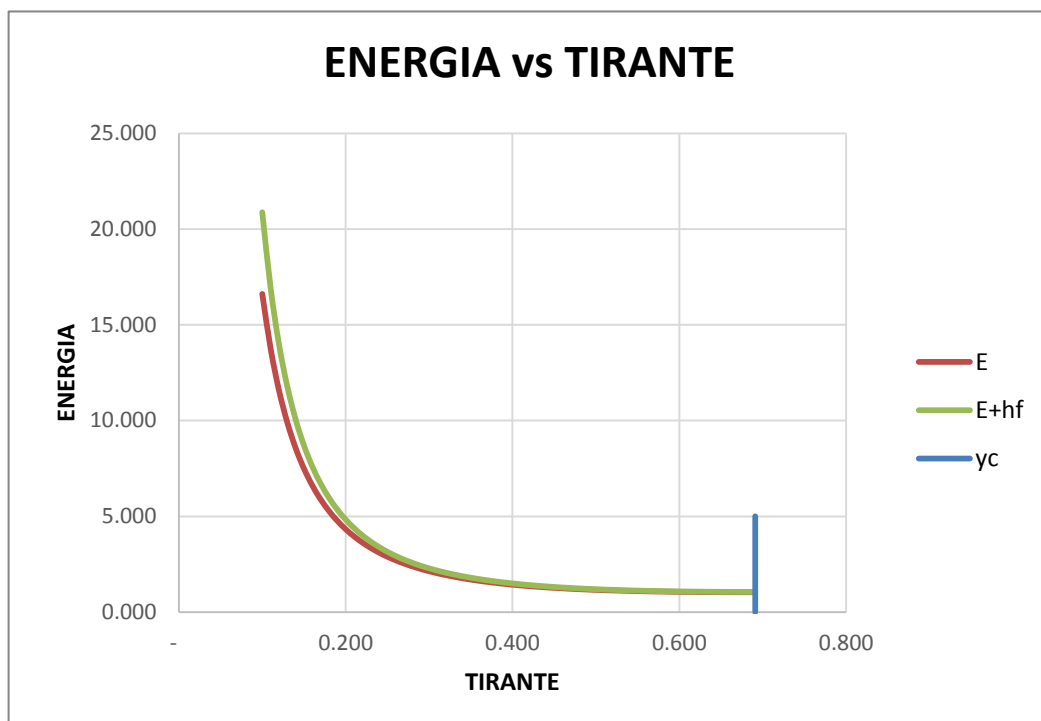


Figura 28. Curvas de energía E y $E + h_f$ vs tirante.

Fuente: Autoría propia, 2018

Esta operación se repite 10 veces obteniéndose de esta manera los 10 tirantes

buscados para el tramo inclinado, dichos valores se visualizan en la siguiente tabla:

Tabla 13. Tirantes de escurrimiento en el tramo inclinado

y	$A = by$	$P = 2y + b$	$R = \frac{A}{P}$	$R^{\frac{2}{3}}$	V	$\frac{V^2}{2g}$	$E = y + \frac{V^2}{2g}$	$\Delta h_f = L_t \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$	$E + \Delta h_f$
(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ^{2/3})	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.691	0.864	2.632	0.328	0.476	2.604	0.346	1.037	0.015	1.052
0.428	0.535	2.106	0.254	0.401	4.206	0.901	1.329	0.055	1.385
0.367	0.459	1.984	0.231	0.377	4.902	1.225	1.592	0.085	1.677
0.332	0.416	1.915	0.217	0.361	5.414	1.494	1.827	0.113	1.940
0.309	0.387	1.869	0.207	0.350	5.819	1.726	2.035	0.139	2.175
0.293	0.366	1.836	0.199	0.341	6.148	1.926	2.219	0.163	2.383
0.280	0.350	1.811	0.194	0.335	6.422	2.102	2.382	0.185	2.567
0.271	0.338	1.791	0.189	0.329	6.651	2.255	2.525	0.205	2.730
0.263	0.329	1.776	0.185	0.325	6.841	2.385	2.648	0.222	2.873
0.257	0.321	1.764	0.182	0.321	7.002	2.499	2.756	0.238	2.996
0.252	0.315	1.754	0.180	0.318	7.140	2.598	2.850	0.252	3.104

Fuente: Autoría propia (2018)

Tabla 14. Valores de los tirantes hallados en el tramo inclinado

a	y_a (m)	L_a (m)	Z_a (m)
0	0.691	0	3.480
1	0.428	5	3.132
2	0.367	10	2.784
3	0.332	15	2.436
4	0.309	20	2.088
5	0.293	25	1.740
6	0.280	30	1.392
7	0.271	35	1.044
8	0.263	40	0.696
9	0.257	45	0.348
10	0.252	50	0.000

Fuente: Autoría propia (2018).

d. Cálculo de borde libre del tramo inclinado

Aplicando la ecuación (2.27) $bJ_{\text{tramo inclinado}} = 0.61 + 0.00371v\sqrt{y}$

Dónde:

$y = y_{1(\text{tramo inclinado})}$ = tirante del primer punto del tramo inclinado (m)

$v = V_{1(\text{tramo inclinado})}$ = velocidad del primer punto en el tramo inclinado (m/s)

b = ancho de solera constante en el tramo inclinado (m)

$Q = vyb$ = caudal constante (m³/s)

Para:

$$y = y_{1(\text{tramo inclinado})} = 0.428\text{m (resultado de la Tabla 14)}$$

$$b = 1.25\text{m (dato de condiciones iniciales)}$$

$$Q = 2.25\text{m}^3/\text{s (dato de condiciones iniciales)}$$

Tendremos:

$$Q = v y b = 2.25\text{m}^3/\text{s} = V_{1(\text{tramo inclinado})} (0.428\text{m})(1.25\text{m})$$

$$V_{1(\text{tramo inclinado})} = 4.206\text{m/s}$$

Reemplazando en la ecuación (2.30)

$$b l_{\text{tramo inclinado}} = 0.61 + 0.00371(4.206)\sqrt{0.428}$$

Obtenemos:

$$b l_{\text{tramo inclinado}} = 0.62\text{m}$$

Reemplazando valores:

$$H_2 = y_{1(\text{tramo inclinado})} + b l_{\text{tramo inclinado}} = 1.048\text{m}$$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$$H_2 = 1.10\text{m}$$

3.4.6. Cálculo de las coordenadas y elevaciones de la trayectoria parabólica

La trayectoria está definida por la ecuación (2.31): $y = -(xtg\theta + \frac{gx^2}{2v_{\max}^2}(1 + tg^2\theta))$

Dónde:

$$tg\theta = S_{\text{tramo inclinado}}$$

$$v_{\max} = 1.5 v_0 \text{ (m/s)}$$

$$g = \text{aceleración de la gravedad} = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$$

Para:

$$S_{\text{tramo inclinado}} = 0.0696$$

$$v_0 = \text{velocidad inicial de la trayectoria} = \text{velocidad final del tramo inclinado (m/s)}$$

De la Tabla 14:

$$y_{\text{final del tramo inclinado}} = y_{10(\text{tramo inclinado})} = 0.252\text{m}$$

$$V_{\text{final del tramo inclinado}} = V_{10(\text{tramo inclinado})} = v_0 = 7.143\text{m/s}$$

Reemplazando en la ecuación (2.28)

$$v_0 = 7.143\text{m/s (sabiendo que } v_{\max} = 1.5 v_0 \text{)}$$

$$tg\theta = S_{\text{tramo inclinado}} = 0.0696$$

Obtenemos:

$$y = -0.0429x^2 - 0.0696x \text{ (m)}$$

Tabla 15. Valores de las coordenadas (x,y) de la trayectoria

x	y	Elevación
0.00	0.000	301.890
0.25	-0.020	301.870
0.50	-0.046	301.844
0.75	-0.076	301.814
1.00	-0.113	301.778
1.25	-0.154	301.736
1.50	-0.201	301.689
1.75	-0.253	301.637
2.00	-0.311	301.579
2.25	-0.374	301.516
2.50	-0.442	301.448
2.75	-0.516	301.374
3.00	-0.595	301.295
3.25	-0.679	301.211
3.50	-0.769	301.121
3.75	-0.864	301.026
4.00	-0.965	300.925
4.25	-1.071	300.819

Fuente: Autoría propia (2018).

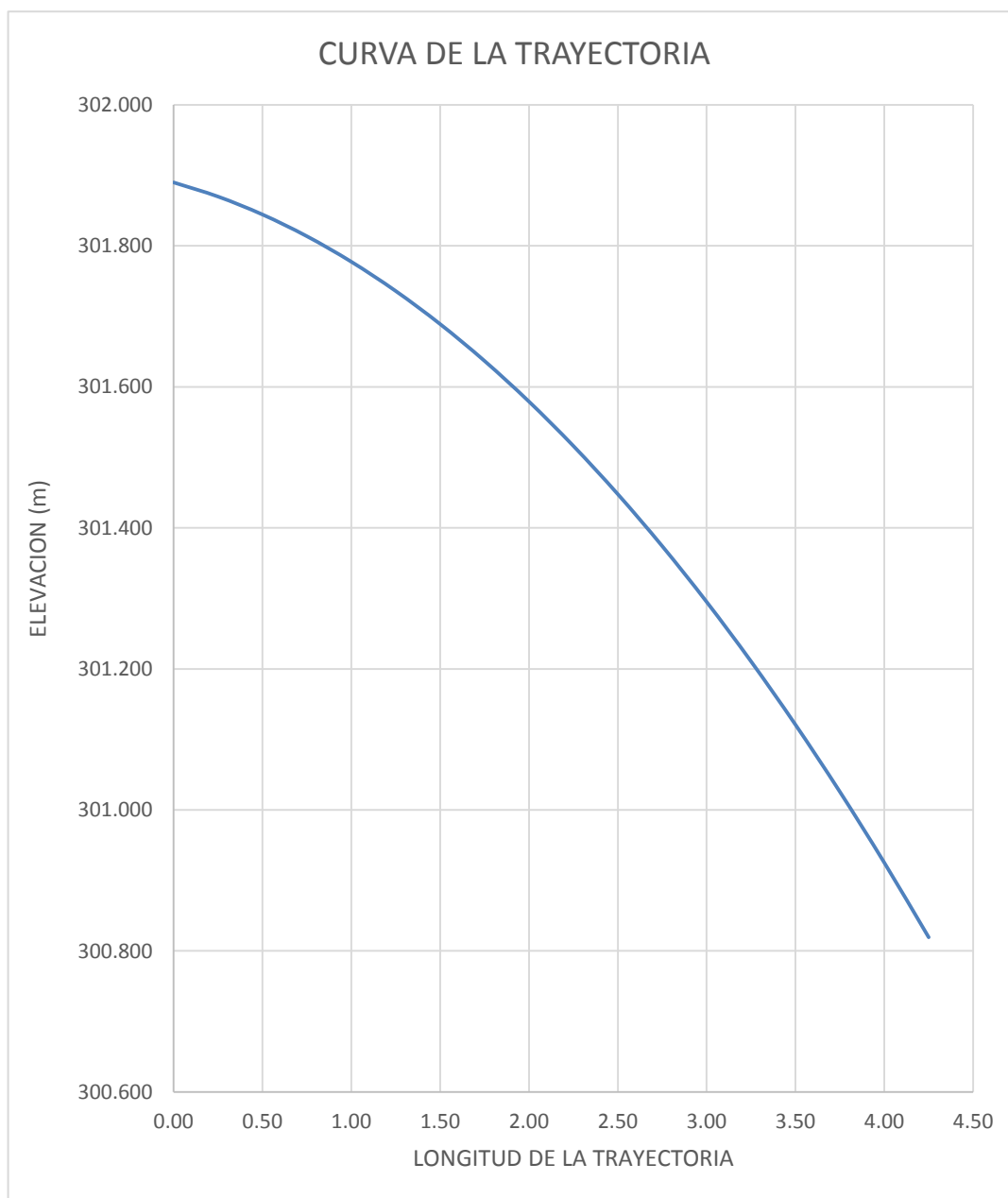


Figura 29. Curva de la Trayectoria
Fuente: Autoría Propia, 2018.

3.4.7. Cálculo de altura del muro del dissipador de energía

a. Cálculo del tirante conjugado menor (antes del resalto hidráulico)

Graficaremos la Curva 1: elevación de la trayectoria vs tirante conjugado menor.

La Curva 1 se calcula con la energía total en la última sección del tramo inclinado:

$$E_{\text{final del tramo inclinado}} = \text{cota 3} + y_{\text{final del tramo inclinado}} + \frac{V_{\text{final del tramo inclinado}}^2}{2g}$$

Dónde:

$E_{\text{final del tramo inclinado}}$ = energía total del punto final del tramo inclinado (m).

cota 3 = cota del punto final del tramo inclinado (m).

$y_{\text{final del tramo inclinado}}$ = tirante final del tramo inclinado (m).

$V_{\text{final del tramo inclinado}}$ = velocidad final del tramo inclinado (m/s).

Para:

cota 3 = 301.890m

$y_{\text{final del tramo inclinado}}$ = 0.252m (valor hallado en la Tabla 14)

$V_{\text{final del tramo inclinado}}$ = 7.143m/s

Obtenemos:

$E_{\text{final del tramo inclinado}} = 304.742\text{m}$

Se tomarán valores de $y_{\text{conjugado menor}}$ que varíen en 0.10m y que no exceda el valor del tirante crítico, los valores de la Curva 1 se visualizan en la siguiente tabla:

Tabla 16. Valores de elevación de la trayectoria (condición de llegada)

Tirante conjugado menor	Área	Velocidad	Energía Cinética	Energía Específica	Elevación
$y_{\text{conjugado menor}}$ (m)	$by_{\text{conjugado menor}}$ (m ²)	V (m/s)	$\frac{V^2}{2g}$ (m)	$y + \frac{V^2}{2g}$ (m)	$E_{\text{final del tramo inclinado}} - E_{\text{especifica}}$ (m)
0.100	0.125	18.000	16.514	16.614	288.128
0.120	0.150	15.000	11.468	11.588	293.154
0.140	0.175	12.857	8.425	8.565	296.177
0.160	0.200	11.250	6.451	6.611	298.131
0.180	0.225	10.000	5.097	5.277	299.465
0.200	0.250	9.000	4.128	4.328	300.414
0.220	0.275	8.182	3.412	3.632	301.110
0.240	0.300	7.500	2.867	3.107	301.635
0.260	0.325	6.923	2.443	2.703	302.039
0.280	0.350	6.429	2.106	2.386	302.356
0.300	0.375	6.000	1.835	2.135	302.607
0.320	0.400	5.625	1.613	1.933	302.809
0.340	0.425	5.294	1.429	1.769	302.973
0.360	0.450	5.000	1.274	1.634	303.108
0.380	0.475	4.737	1.144	1.524	303.218
0.400	0.500	4.500	1.032	1.432	303.310
0.420	0.525	4.286	0.936	1.356	303.386
0.440	0.550	4.091	0.853	1.293	303.449
0.460	0.575	3.913	0.780	1.240	303.502
0.480	0.600	3.750	0.717	1.197	303.545
0.500	0.625	3.600	0.661	1.161	303.581
0.520	0.650	3.462	0.611	1.131	303.611
0.540	0.675	3.333	0.566	1.106	303.636
0.560	0.700	3.214	0.527	1.087	303.655
0.580	0.725	3.103	0.491	1.071	303.671
0.600	0.750	3.000	0.459	1.059	303.683
0.620	0.775	2.903	0.430	1.050	303.692
0.640	0.800	2.813	0.403	1.043	303.699

Fuente: Autoría propia (2018).

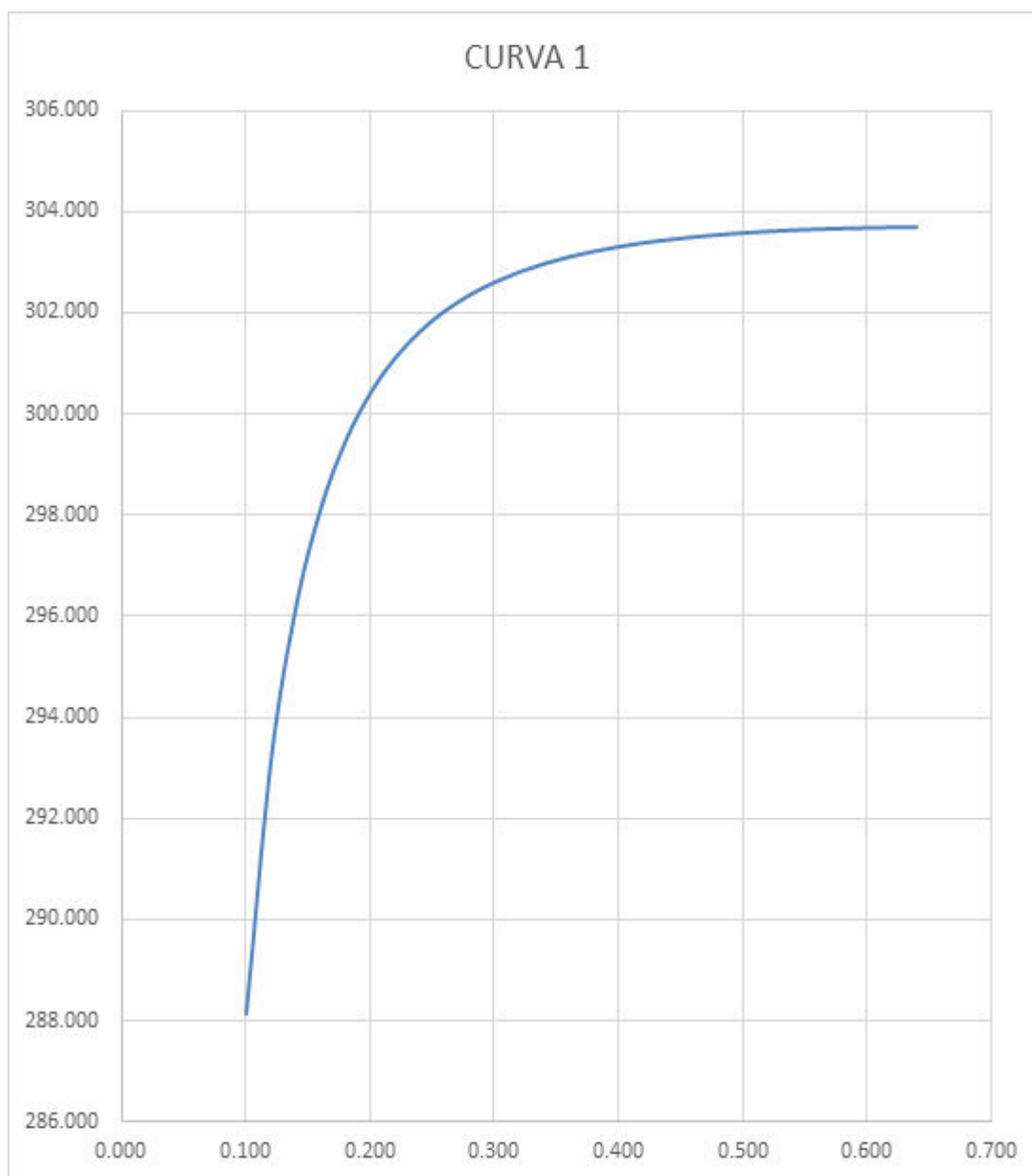


Figura 30. Curva de elevación de la trayectoria vs tirante conjugado menor
Fuente: Autoría Propia, 2018.

Graficaremos la Curva 2: elevación de fondo del dissipador de energía vs tirante conjugado menor, se grafica con las condiciones de salida del colchón que están definidas por la energía de la sección del canal aguas abajo:

$$E_{\text{aguas abajo}} = \text{cota } 6 + y_{\text{aguas abajo}} + \frac{V_{\text{aguas abajo}}^2}{2g}$$

Dónde:

$E_{\text{aguas abajo}}$ = energía total del canal aguas abajo (m).

cota 6 = cota del canal aguas abajo (m).

$y_{\text{aguas abajo}}$ = tirante del canal aguas abajo (m).

$V_{\text{aguas abajo}}$ = velocidad en el canal aguas abajo (m/s).

Para:

cota 6 = 301.040m (dato de la tabla 5)

$y_{\text{aguas abajo}}$ = 0.749m (dato de la tabla 5)

$V_{\text{aguas abajo}}$ = 2.071m/s (dato de la tabla 5)

Obtenemos:

$$E_{\text{aguas abajo}} = 302.008\text{m}$$

Se tomarán los mismos valores de $y_{\text{conjugado menor}}$ que aparecen en la Tabla 16 pero los cálculos de energía se realizarán con el tirante conjugado mayor $y_{\text{conjugado mayor}}$

Tabla 17. Valores de elevación del dissipador de energía (condición de salida)

Tirante conjugado	Tirante conjugado mayor (m)	E. Cinética (m)	E. Específica (m)	Elevación (m)
menor (m)				
$y_{\text{conjugado menor}}$	$\frac{y_{\text{conj.men.}}}{2} (\sqrt{1+8F_{r1}^2} - 1)$	$\frac{V_{\text{conj.may}}^2}{2g}$	$y_{\text{conj.may}} + \frac{V_{\text{conj.may}}^2}{2g}$	$E_{\text{aguas abajo}} - E_{\text{Especifica}}$
0.100	2.521	0.026	2.547	299.461
0.120	2.287	0.032	2.319	299.689
0.140	2.103	0.037	2.141	299.868
0.160	1.953	0.043	1.997	300.012
0.180	1.828	0.049	1.877	300.131
0.200	1.720	0.056	1.776	300.232
0.220	1.626	0.062	1.689	300.320
0.240	1.543	0.069	1.613	300.396
0.260	1.469	0.077	1.546	300.462
0.280	1.402	0.084	1.486	300.522
0.300	1.341	0.092	1.433	300.575
0.320	1.286	0.100	1.386	300.622
0.340	1.234	0.108	1.343	300.666
0.360	1.187	0.117	1.304	300.704
0.380	1.142	0.127	1.269	300.739
0.400	1.101	0.136	1.237	300.771
0.420	1.062	0.147	1.208	300.799
0.440	1.025	0.157	1.182	300.826
0.460	0.990	0.168	1.159	300.850
0.480	0.957	0.180	1.138	300.871
0.500	0.926	0.192	1.119	300.890
0.520	0.897	0.205	1.102	300.906
0.540	0.869	0.219	1.087	300.920
0.560	0.842	0.233	1.075	300.933
0.580	0.816	0.248	1.064	300.944
0.600	0.791	0.264	1.055	300.953
0.620	0.768	0.280	1.048	300.960
0.640	0.745	0.297	1.043	300.966

Fuente: Autoría propia (2018).

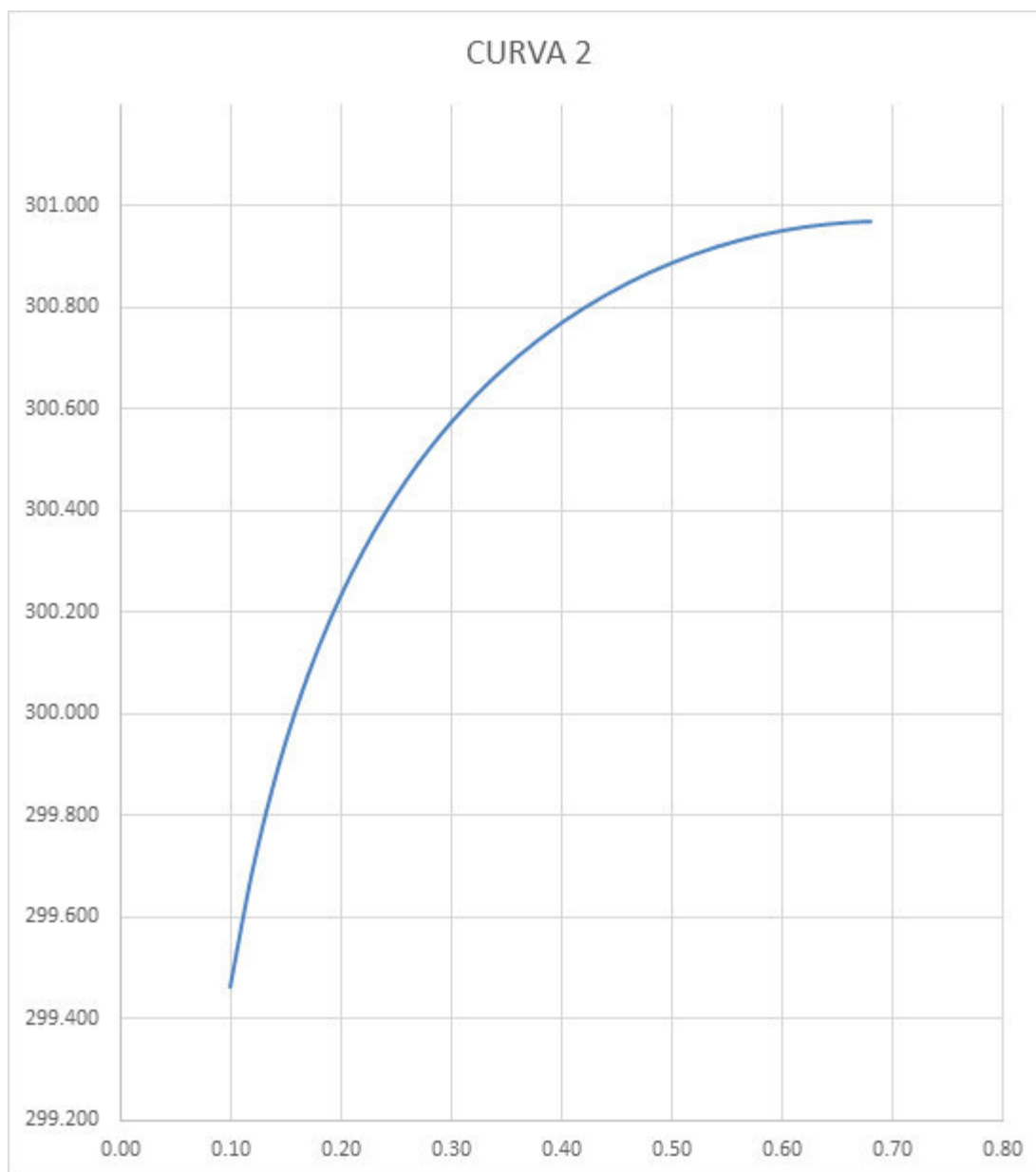


Figura 31. Curva de elevación del fondo del dissipador vs tirante conjugado menor
Fuente: Autoría Propia, 2018.

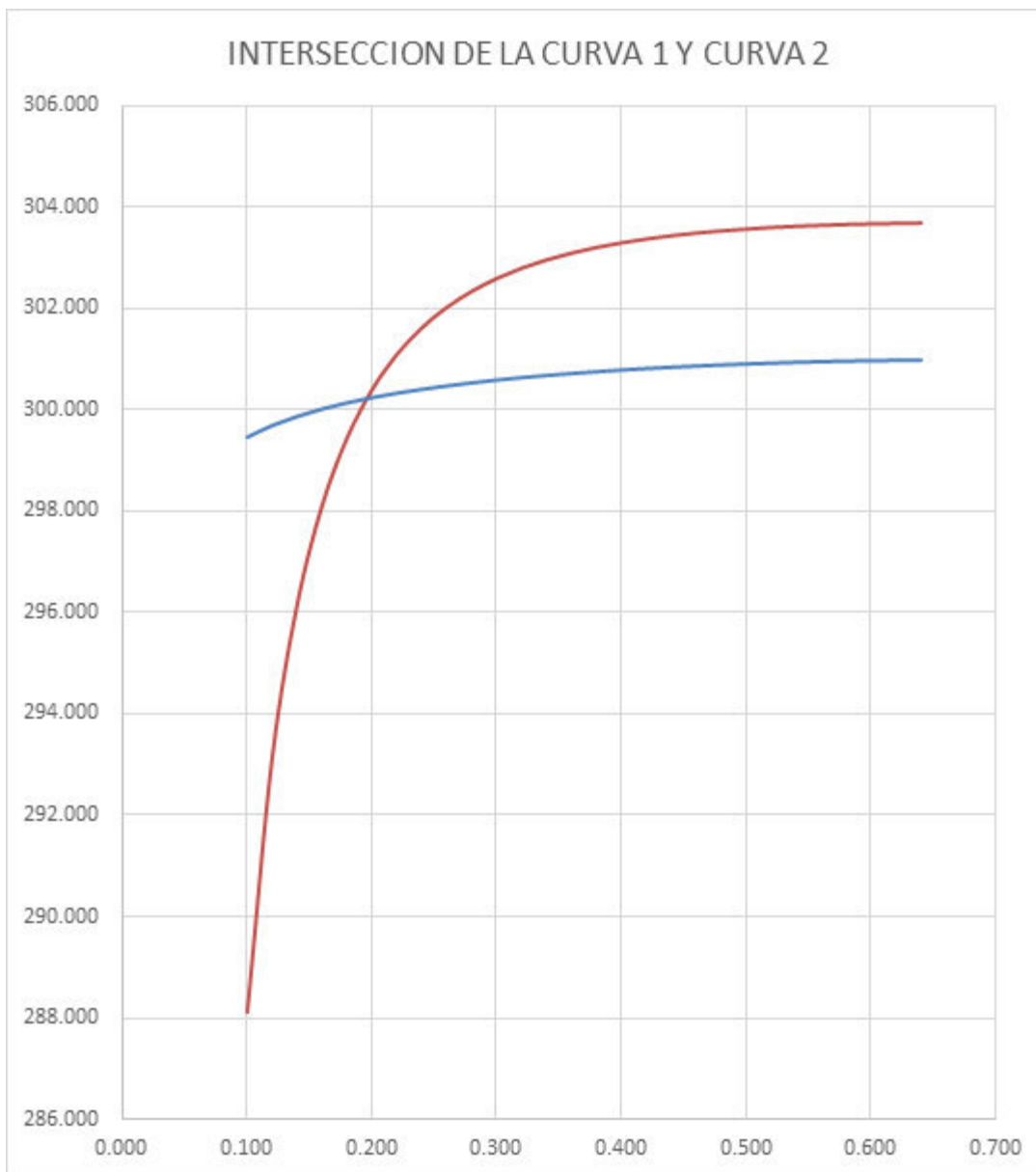


Figura 32. Intersección de las curvas de elevación
Fuente: Autoría Propia, 2018.

En la Figura 32 ubicamos el punto de intersección de la Curva 1 y la Curva 2.

$$y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m (antes del resalto hidráulico)}$$

$$\text{cota}_{\text{disipador de energía}} = 300.247\text{m (altura del disipador de energía sin ahogamiento)}$$

b. Cálculo del tirante conjugado mayor (después del resalto hidráulico)

$$\text{De la ecuación (2.11)} \quad y_2 = \frac{y_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_{r_1}^2} - 1)$$

Dónde:

$$y_1 = y_{\text{conjugado menor}} = \text{tirante conjugado menor antes del resalto hidráulico (m)}$$

$$y_2 = y_{\text{conjugado mayor}} = \text{tirante conjugado mayor después del resalto hidráulico (m)}$$

$$F_{r_1} = \text{número de Froude antes del resalto hidráulico}$$

$$\text{De la ecuación (2.1)} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

Dónde:

$$F_r = F_{r_1} = \text{número de Froude antes del resalto hidráulico}$$

$$V = V_{\text{antes del resalto}} = \text{velocidad antes del resalto hidráulico (m/s)}$$

$$y = y_{\text{conjugado menor}} = \text{tirante conjugado mayor después del resalto hidráulico (m)}$$

$$g = 9.81\text{m}^2/\text{s}$$

Para:

$$y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m}$$

$$F_{r_1} = 6.623$$

$$b = 1.25\text{m (dato de condiciones iniciales)} = \text{ancho de la base del disipador de energía}$$

Obtenemos:

$$y_{\text{conjugado mayor}} = 1.740\text{m (tirante conjugado mayor después del resalto hidráulico)}$$

c. Cálculo de la pérdida de energía en el resalto hidráulico

$$\text{De la ecuación (2.12)} \quad \Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

Dónde:

$$y_1 = y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m} = \text{tirante conjugado menor antes del resalto hidráulico}$$

$$y_2 = y_{\text{conjugado mayor}} = 1.740\text{m} = \text{tirante conjugado mayor después del resalto hidráulico}$$

Obtenemos:

$$\Delta E = 2.698\text{m}$$

d. Cálculo de la profundidad del fondo del dissipador de energía

De la ecuación de continuidad $Q = (V_{\text{despues del resalto}})(y_{\text{conjugado mayor}})(b)$

Para:

$$y_{\text{conjugado mayor}} = 1.740\text{m}$$

$$Q = 2.25\text{m}^3/\text{s}$$

$$b = 1.25\text{m}$$

Obtenemos:

$$V_{\text{despues del resalto}} = 1.035\text{m/s}$$

Tenemos:

$$E_{\text{despues del resalto}} = y_{\text{conjugado mayor}} + \frac{V_{\text{despues del resalto}}^2}{2g}$$

Dónde:

$E_{\text{despues del resalto}}$ = energía específica después del resalto hidráulico (m)

$y_{\text{conjugado mayor}}$ = tirante conjugado mayor después del resalto hidráulico (m)

$V_{\text{despues del resalto}}$ = velocidad después del resalto hidráulico (m/s)

Para:

$$y_{\text{conjugado mayor}} = 1.740\text{m}$$

$$V_{\text{despues del resalto}} = 1.035\text{m/s}$$

Reemplazando en:

$$E_{\text{despues del resalto}} = y_{\text{conjugado mayor}} + \frac{V_{\text{despues del resalto}}^2}{2g}$$

Obtenemos:

$$E_{\text{despues del resalto}} = 1.795\text{m}$$

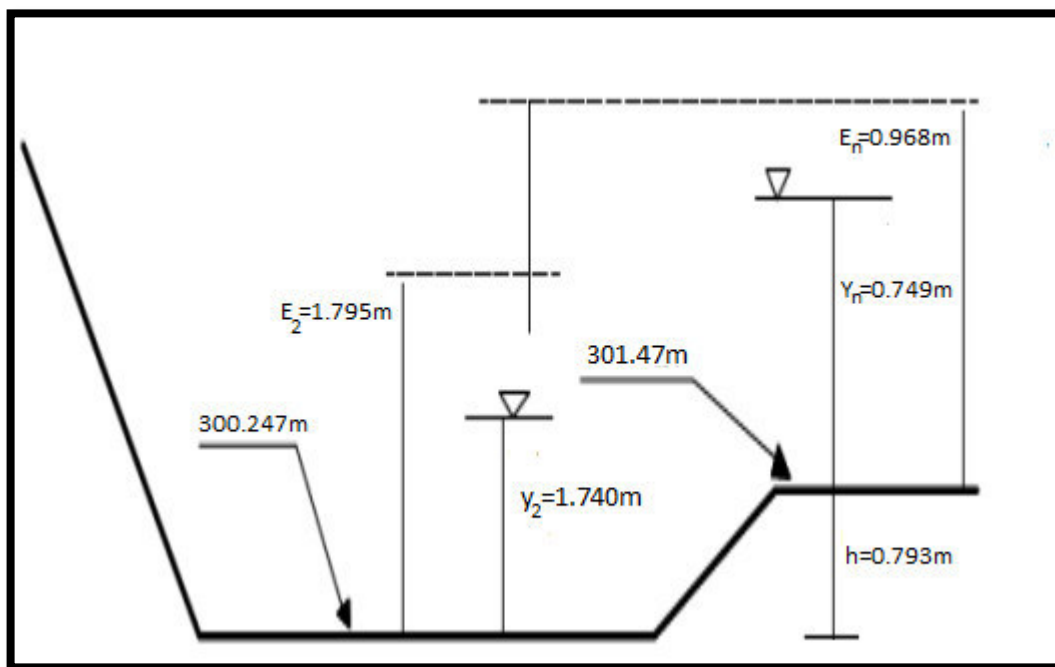


Figura 33. Cota y niveles de energía originales del dissipador de energía.
Fuente: Autoría Propia, 2018.

Para asegura el funcionamiento del dissipador de energía consideraremos un 40% de ahogamiento, es decir se tendrá que profundizar la cota del dissipador de energía.

$$1.4E_{\text{despues del resalto}} = 1.4 \times 1.795\text{m} = 2.513\text{m}$$

La elevación del dissipador considerando un 40% de ahogamiento será:

$$\text{cota}_{\text{dissipador de energia}} = EGE_{(\text{aguas abajo})} - 1.4E_{\text{despues del resalto}}$$

De la Tabla 5 (canal aguas abajo):

$$EGE_{(\text{aguas abajo})} = \text{cota}_{(\text{aguas abajo})} + E_{(\text{aguas abajo})} = \text{cota}_{(\text{aguas abajo})} + y_{(\text{aguas abajo})} + \frac{V_{(\text{aguas abajo})}^2}{2g}$$

$$EGE_{(\text{aguas abajo})} = 301.04\text{m} + 0.749\text{m} + 0.219\text{m} = 302.008\text{m}$$

$$\text{Reemplazando: } EGE_{(\text{aguas abajo})} = 302.008\text{m y } 1.4E_{\text{despues del resalto}} = 2.513\text{m}$$

$$\text{cota}_{\text{dissipador de energia}} = 299.495\text{m}$$

Hallando la profundidad:

$$h = \text{cota}_{(\text{aguas abajo})} - \text{cota}_{\text{dissipador de energia}} = 301.04\text{m} - 299.495\text{m}$$

$$h = 1.545\text{m}$$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$$h_{(\text{final})} = 1.55\text{m}$$

e. Cálculo de cota del dissipador de energía (considerando 40% ahogamiento)

Una vez hallado la profundidad del dissipador de energía con su porcentaje de ahogamiento ya se puede hallar la cota de fondo del dissipador de energía

$$cota_{\text{dissipador de energía}} = cota_{\text{(aguas abajo)}} - h_{\text{(final)}}$$

Dónde:

$$cota_{\text{(aguas abajo)}} = 301.04\text{m}$$

$$h_{\text{(final)}} = 1.55\text{m}$$

Obtenemos:

$$cota_{\text{dissipador de energía}} = 299.49\text{m}$$

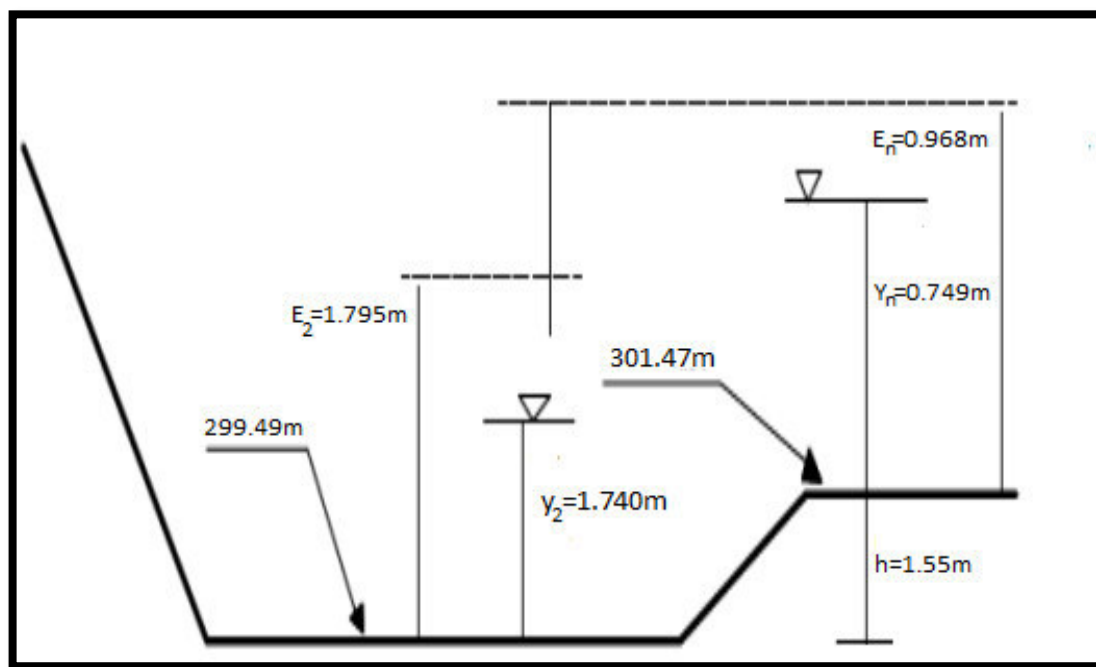


Figura 34. Cota y niveles de energía del dissipador considerando 40% de ahogamiento
Fuente: Autoría Propia, 2018.

f. Cálculo de la longitud del resalto hidráulico

De la ecuación (2.15) $L_{resalto} = K(y_2 - y_1)$

Dónde:

$L_{resalto}$ = longitud del resalto hidráulico (m)

K = coeficiente variable según la sección del canal (Ver Tabla 1)

$y_1 = y_{conjugado\ menor}$ = tirante conjugado menor antes del resalto hidráulico (m)

$y_2 = y_{conjugado\ mayor}$ = tirante conjugado mayor después del resalto hidráulico (m)

Para:

Sección del dissipador de energía: rectangular (dato de condiciones iniciales)

$K = 5$ (por ser un canal de sección rectangular, dato de la Tabla1)

$y_1 = y_{conjugado\ menor} = 0.196\text{m}$

$y_2 = y_{conjugado\ mayor} = 1.740\text{m}$

Tendremos:

$L_{resalto} = 5(1.740\text{m} - 0.196\text{m})$

Obteniendo:

$L_{resalto} = 7.72\text{m}$

g. Cálculo de borde libre en el dissipador de energía

Bureau of Reclamation propone la medida del borde libre hallando la intersección de la

curva de la Figura 35 con el valor de $\frac{(Q)(V_{\text{antes del resalto}})(y_{\text{conjugado menor}})}{A_{\text{antes del resalto}}}$

Los valores requeridos son:

$$Q = 2.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{\text{antes del resalto}} = 9.184 \text{ m/s}$$

$$y_{\text{conjugado menor}} = 0.196 \text{ m}$$

$$A_{\text{antes del resalto}} = 0.245 \text{ m}^2$$

Convirtiendo a pies los valores requeridos:

$$Q = 2.25 \text{ m}^3/\text{s} = 79.458 \text{ pies}^3/\text{s}$$

$$V_{\text{antes del resalto}} = 9.184 \text{ m/s} = 30.130 \text{ pies/s}$$

$$y_{\text{conjugado menor}} = 0.196 \text{ m} = 0.643 \text{ pies}$$

$$A_{\text{antes del resalto}} = 0.245 \text{ m}^2 = 2.637 \text{ pies}^2$$

Reemplazando obtenemos $\frac{(Q)(V_{\text{antes del resalto}})(y_{\text{conjugado menor}})}{A_{\text{antes del resalto}}} = 583.764$, ahora hallamos

la intersección del valor 583.764 con la curva de la figura que se presenta a continuación:

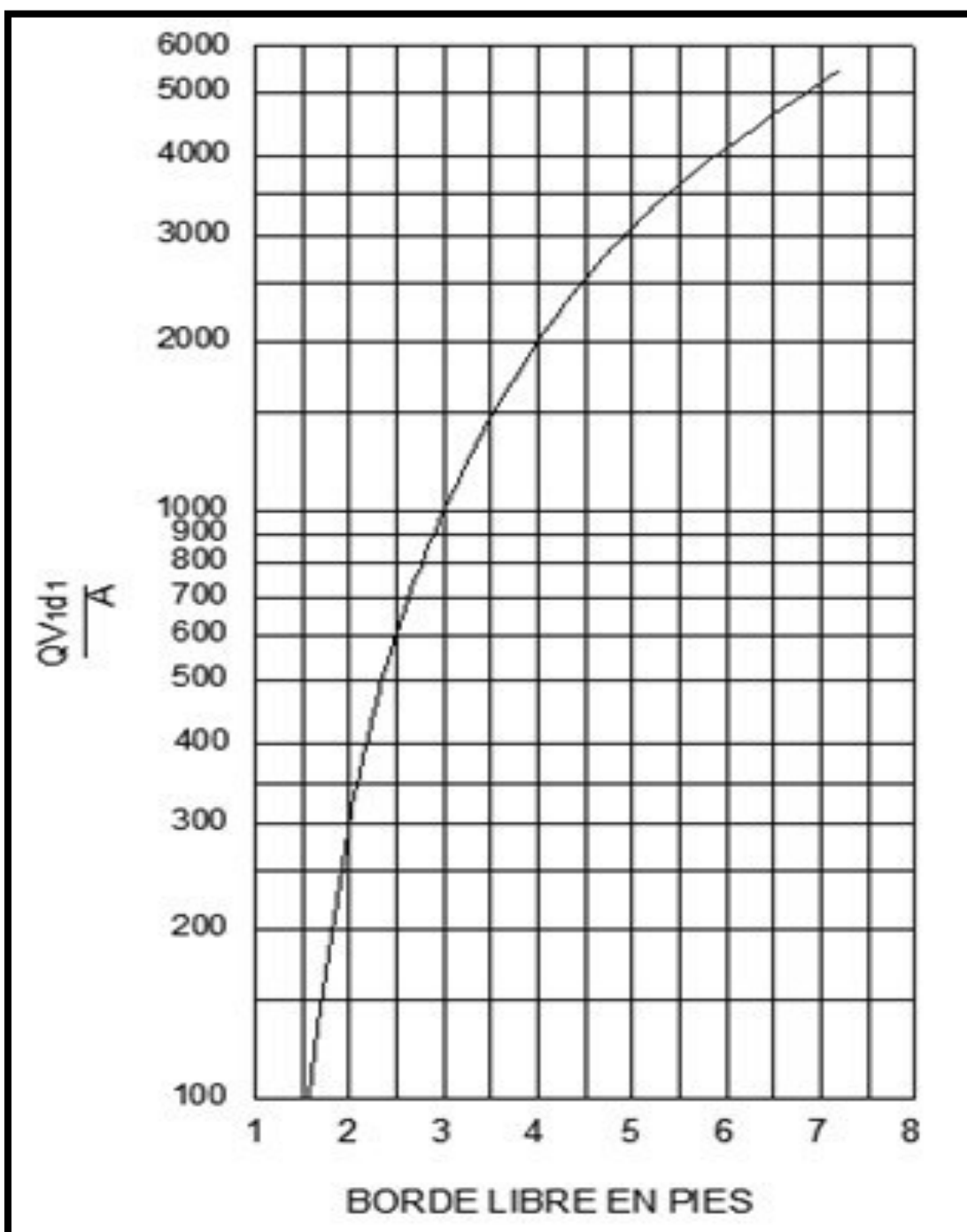


Figura 35. Borde libre para disipadores de energía en rápidas
Fuente: Bureau of Reclamation, 1978.

Ubicando el punto de intersección del valor 583.764 y la Curva de la Figura 35

obtenemos un $b.l._{\text{disipador de energía}} = 2.45$ pies

Convirtiendo 2.45 pies a metros obtendremos:

$$b.l._{\text{disipador de energía}} = 0.747\text{m}$$

Tenemos:

$$H_3 = y_{\text{conjugado mayor}} + b.l._{\text{disipador de energía}}$$

Dónde:

H_3 = altura del muro del disipador de energía (m)

$y_{\text{conjugado mayor}}$ = tirante conjugado mayor después del resalto hidráulico = 1.740m

$b.l._{\text{disipador de energía}}$ = borde libre del disipador de energía = 0.747m

Obtenemos:

$$H_3 = 2.487\text{m}$$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$$H_3 = 2.50\text{m}$$

3.4.8. Cálculo de longitud del dissipador de energía

Seleccionamos el estaque amortiguador con los siguientes parámetros:

$$Fr_{\text{antes del resalto}} = 6.623 > 4.5$$

$$q = 1.8 \text{ m}^2/\text{s} < 16.86 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V_{\text{antes del resalto}} = 9.184 \text{ m/s} < 15 \text{ m/s}$$

El dissipador de energía será un Estanque Amortiguador USBR tipo III. (ver Tabla 4)

$$\text{Longitud del estanque} = 2.8y_{\text{despues del resalto}} \text{ (parámetro indicado en la Tabla 4)}$$

Dónde:

$$y_{\text{despues del resalto}} = 1.740 \text{ m}$$

Obtenemos:

$$\text{Longitud del estanque} = 4.872 \text{ m}$$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$$\text{Longitud del estanque} = 4.90 \text{ m}$$

Tener en cuenta que esta longitud abarca desde la cara frontal donde terminan los dientes deflectores (ubicados al final del tramo inclinado que se encuentra después de la trayectoria) hasta el final de la longitud horizontal del umbral terminal.

3.4.9. Cálculo de dimensiones de los elementos del dissipador de energía

Para calcular las dimensiones de los elementos del estanque amortiguador se hallará la intersección del $Fr_{\text{antes del resalto}} = 6.623$ y la curva de la Figura 21, donde obtendremos los valores de las relaciones entre $\frac{h_3}{y_{\text{conjugado menor}}}$ y $\frac{h_4}{y_{\text{conjugado menor}}}$.

h_3 , h_4 son parámetros para la construcción de los elementos en un Estanque Amortiguador USBR tipo III).

De la intersección de $Fr_1 = 6.623$ y la curva de la Figura 21 se obtiene los valores de

$$\frac{h_3}{y_{\text{conjugado menor}}} = 1.80$$

$$\frac{h_4}{y_{\text{conjugado menor}}} = 1.40$$

$$\text{Para } y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m}$$

Obtenemos:

$$h_3 = 0.35\text{m}$$

$$h_4 = 0.27\text{m}$$

a. Dientes deflectores

Calculando el número de dientes deflectores y sus dimensiones (Estanque tipo III)

Dónde:

b = ancho de base del dissipador de energía (m)

$y_{\text{conjugado menor}}$ = tirante conjugado menor antes del resalto hidráulico (m)

Para:

$b = 1.25\text{m}$ (dato de condiciones iniciales)

$y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m}$

Obtendremos:

$$\text{Número de dientes} = \frac{b}{2y_{\text{conjugado menor}}} = \frac{1.25\text{m}}{2(0.196\text{m})} = 3.189$$

$$\text{Altura} = y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m}$$

$$\text{Ancho} = y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m}$$

$$\text{Espacio entre dientes} = y_{\text{conjugado menor}} = 0.196\text{m}$$

$$\text{Espacio fraccional} = 0.5y_{\text{conjugado menor}} = (0.5)(0.196\text{m}) = 0.098\text{m}$$

De los valores obtenidos, para el número de cantidades aproximaremos a números enteros y las dimensiones redondeando para fines prácticos tendremos los siguientes valores:

Número de dientes = 3

Altura = 0.21m

Ancho = 0.21m

Espacio entre dientes = 0.21m

Espacio fraccional = 0.1m

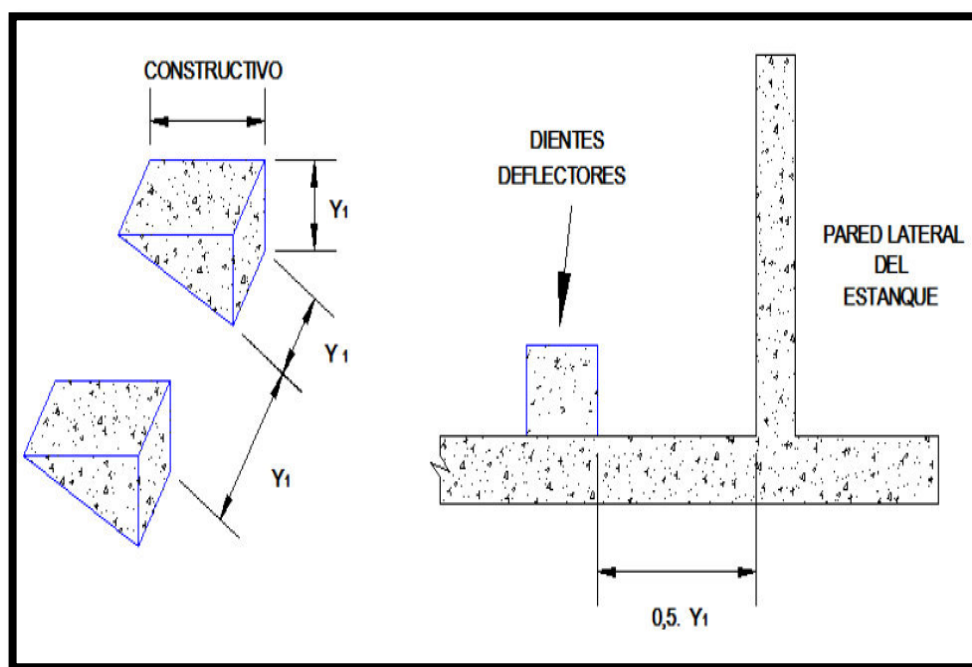


Figura 36. Dimensiones de los dientes deflectores
Fuente: Villamarín, 2013.

b. Dados disipadores

Calculando el número de dados disipadores y sus dimensiones (Estanque tipo III)

$$\text{Número de dados} = n = \frac{b}{1.5h_3} = \frac{1.25m}{1.5(0.35m)} = 2.381 \approx 2$$

$$\text{Altura} = h_3 = 0.35m$$

$$\text{Ancho} = 0.75h_3 = (0.75)(0.35m) = 0.263m, \text{ adoptaremos un Ancho} = 0.31m$$

$$\text{Largo} = 1.2h_3 = (1.2)(0.35m) = 0.420m$$

$$\text{Ancho superior} = 0.2h_3 = (0.2)(0.35m) = 0.070m$$

$$\text{Espacio entre dados} = 0.75h_3 = 0.263m, \text{ adoptaremos Espacio entre dados} = 0.31m$$

$$\text{Espacio fraccional} = 0.375h_3 = 0.131m, \text{ adoptaremos Espacio fraccional} = 0.16m$$

$$\text{Ubicación} = 0.8y_2 = 1.392m, \text{ adoptaremos Ubicación} = 1.40m$$

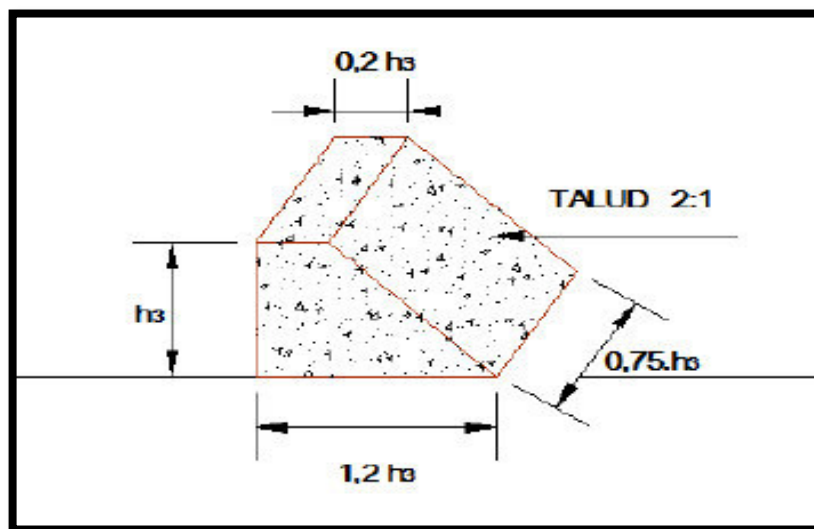


Figura 37. Dimensiones de los dados disipadores

Fuente: Villamarín, 2013.

c. Umbral terminal

Calculando las dimensiones del umbral terminal (Estanque tipo III)

Talud = 2:1

Altura = $h_4 = 0.27\text{m}$

Largo de la base inferior = $2.04h_4 = (2.04)(0.27\text{m}) = 0.552\text{m}$

Largo de la cara superior del umbral = $0.04h_4 = (0.04)(0.27\text{m}) = 0.01\text{m}$

Para el largo del umbral adoptaremos:

Largo de la base inferior = 0.55m

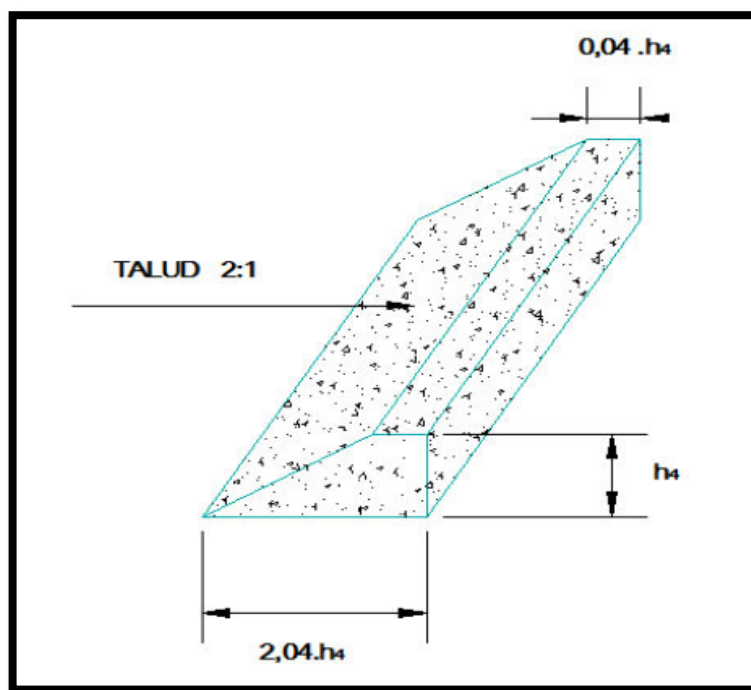


Figura 38. Dimensiones del umbral de salida
Fuente: Villamarín, 2013.

3.4.10. Cálculo de longitud de la transición de salida

De la ecuación (2.16) para: $L_{\text{transición de salida}} = \frac{T_{\text{aguas abajo}} - T_{\text{disipador de energía}}}{2 \tan \alpha}$

$T_{\text{aguas abajo}} = 2.198\text{m}$ (dato de la Tabla 5)

$T_{\text{disipador de energía}} = 1.25\text{m}$ ($b = T_{\text{disipador de energía}}$, por ser de sección rectangular constante)

$\alpha = 12.5^\circ$ (ángulo recomendado por la USBR, se indica en condiciones iniciales)

Obtenemos: $L_{\text{transición de salida}} = 2.138\text{m}$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$L_{\text{transición de salida}} = 2.15\text{m}$

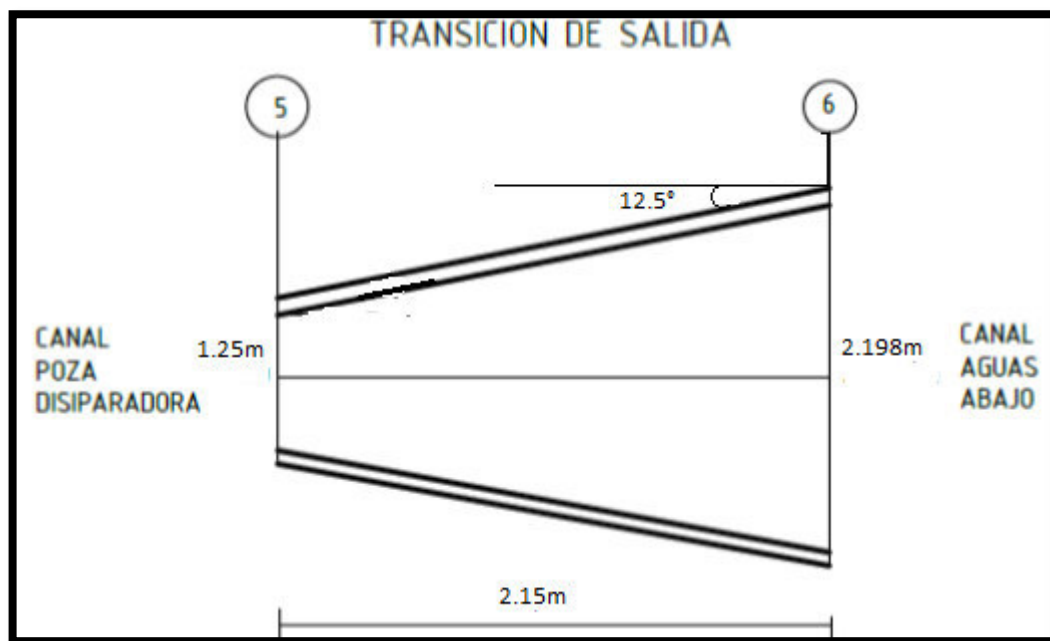


Figura 39. Parámetros de la transición de salida
Fuente: Autoría Propia, 2018.

3.4.11. Cálculo de altura del muro aguas abajo

Está definido:

$$H_4 = y_{\text{aguas abajo}} + b.l._{\text{aguas abajo}}$$

Dónde:

H_4 = altura del muro aguas abajo (m).

$y_{\text{aguas abajo}}$ = tirante aguas abajo = 0.749m (dato de la Tabla 5)

$b.l._{\text{aguas abajo}}$ = borle libre del canal aguas abajo = 0.3m (valor de la Tabla 6)

Reemplazando en la ecuación $H_1 = y_{\text{aguas arriba}} + b.l._{\text{aguas arriba}}$

$$y_{\text{aguas arriba}} = 0.732\text{m}$$

$$b.l._{\text{aguas arriba}} = 0.30\text{m}$$

Obtenemos:

$$H_4 = 1.049\text{m}$$

Para fines prácticos constructivos consideraremos:

$$H_4 = 1.10\text{m}$$

3.4.12. Cálculo para verificar la formación de ondas en la salida

Para descartar la formación de ondas en la transición de salida se debe cumplir la relación de $\alpha'' > \alpha$

Dónde:

$$ctg \alpha'' = 3.375 \bar{F}$$

$$\bar{F} = \frac{F_{\text{despues del resalto}} + F_{\text{cota 6}}}{2}$$

$F_{\text{cota 6}}$ = número de Froude en la cota 6

$F_{\text{despues del resalto}}$ = número de Froude después del resalto hidráulico

Además:

$$tg \theta = \frac{\text{cota 6} - \text{cota}_{\text{disipador de energia}}}{L_{\text{transicion de salida}}}$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{(1-K) y g \cos \theta}}$$

Dónde:

$$tg \theta = \frac{301.040\text{m} - 299.49\text{m}}{2.15\text{m}} = 0.721$$

$$\theta = 35.792^\circ$$

Para $K = 0$ (por estar en el mismo plano)

$$F_{\text{cota6}} = 0.848$$

$$F_{\text{despues del resalto}} = 0.278$$

Obtenemos:

$$\bar{F} = 0.563$$

Tendremos:

$$\text{ctg} \alpha'' = 3.375 \bar{F} = (3.375)(0.563) = 1.900$$

$$\alpha'' = 27.76^\circ$$

No se forman ondas en la transición de salida ya que $(\alpha'' = 27.76^\circ) > (\alpha = 12.5^\circ)$.

CAPITULO 4 – RESULTADOS

4.1. Tablas de resultados

4.1.1. Transición de entrada

Tabla 18. Parámetros de la transición de entrada

Parámetros	Valor	Unidades
Cota aguas arriba	305.470	msnm
Cota de sección de control	305.370	msnm
Ancho (aguas arriba)	0.70	m
Ancho (sección de control)	1.25	m
Angulo formado por los espejos	12.50	grados sexagesimales
Longitud de transición	2.15	m
Altura del muro	1.10	m
Tipo de flujo	subcrítico	-

Fuente: Autoría Propia, 2018.

4.1.2. Tramo inclinado

Tabla 19. Parámetros del tramo inclinado

Parámetros	Valor	Unidades
Cota inicial	305.370	msnm
Cota final	301.890	msnm
Ancho	1.25	m
Tirante	variable	m
Altura del muro	1.10	m
Tipo de flujo	supercrítico	-

Fuente: Autoría Propia, 2018.

4.1.3. Trayectoria

Tabla 20. Parámetros de la trayectoria

Parámetros	Valor	Unidades
Cota inicial	301.890	msnm
Cota final	300.819	msnm
Ancho	1.25	m
Tirante	variable	m
Distancia X	4.250	m
Distancia Y	1.071	m

Fuente: Autoría Propia, 2018.

4.1.4. Disipador de energía

Tabla 21. Parámetros del disipador de energía

Parámetros	Valor	Unidades
Ancho	1.25	m
Cota de fondo del disipador	299.490	msnm
Tirante conjugado menor	0.196	m
Tirante conjugado mayor	1.740	m
Longitud del estanque	4.90	m
Profundidad	1.55	m
Altura del muro	2.50	m
Tipo de disipador	Estanque Tipo III	-
	Dos hileras de	
	bloques y un	
Accesorios	umbral de salida	-

Fuente: Autoría Propia, 2018.

4.1.5. Transición de salida

Tabla 22. Parámetros de la transición de salida

Parámetros	Valor	Unidades
Cota de fondo de poza	299.490	msnm
Cota aguas abajo	301.040	msnm
Ancho (poza)	1.25	m
Ancho (aguas abajo)	0.70	m
Angulo formado por los espejos	12.5	grados sexagesimales
Longitud	2.15	m
Altura del muro	1.10	m
Tipo de flujo	subcrítico	-

Fuente: Autoría Propia, 2018.

4.2. Discusión de resultados

- a. Debido al cambio de la sección transversal del canal en la transición de entrada la velocidad tiende a incrementarse, lo que genera que el flujo pase de régimen subcrítico a régimen crítico.
- b. En el tramo inclinado el flujo presenta un régimen supercrítico debido a la pendiente fuerte, lo cual origina a su vez que los tirantes disminuyan en medida que la velocidad aumente.
- c. En la trayectoria su cota inicial está por encima de la cota del canal aguas abajo, pero la cota final de la trayectoria está por debajo de la cota del canal aguas abajo.
- d. En el dissipador de energía se puede notar que al colocarle elementos (dientes deflectores, dados dissipadores y umbral terminal) se puede disminuir su longitud.
- e. En la transición de salida la energía total (cota + energía específica) aguas abajo es mayor que la energía total después del resalto hidráulico, pero la energía específica aguas abajo es menor que la energía específica después del resalto hidráulico.

CONCLUSIONES

- a. En la transición de entrada inicialmente se presenta una velocidad de 2.071m/s y un tirante de 0.749m (característica del canal aguas arriba con régimen subcrítico) hasta llegar a una velocidad crítica de 2.604m/s y un tirante crítico de 0.691m (condiciones críticas que se presentan en la sección de control), la transición de entrada resultado del cálculo tiene una longitud de 2.15m y la altura de muro incluyendo el borde libre por seguridad es de 1.10m , la sección transversal pasa de una sección trapezoidal a una sección rectangular constituyendo la transición de entrada.
- b. De los cálculos para la sección de control se tiene como resultado un vertedero que condicionara la formación del flujo crítico.
- c. El tramo inclinado resultado del cálculo tendrá una pendiente de 0.0696m/m que va desde la cota 305.370msnm (sección de control) hasta la cota 301.890msnm (inicio de la trayectoria), el muro del tramo inclinado tiene una altura de 1.10m incluyendo el borde el libre por seguridad.
- d. La trayectoria tendrá una longitud de 4.25m , iniciándose en la cota 301.890msnm hasta la cota 300.819msnm .

- e. El tramo inclinado después de la trayectoria se inicia en la cota 300.819 msnm y finaliza en la cota 299.49msnm, presentando una pendiente de 0.5m/m.
- f. El resultado del cálculo exige un dissipador de energía del tipo USBR tipo III que estará profundizada 1.55 m, de 4.90m de longitud y el muro de encauzamiento será de una altura de 2.50m, el estanque contara en su ingreso con 3 dientes deflectores que se estarán espaciados 0.21m con dimensiones de 0,21m de altura y ancho de 0.21m, posteriormente se ubicaran 2 dados dissipadores que estarán ubicados a 1.40m de los dientes deflectores y espaciados 0.31m entre ellos, con dimensiones de 0.35m de altura, 0.31m de ancho y 0.42m de largo, finalmente ira un umbral de salida de 0.27m de altura, 0.55m de largo en la base inferior, 0.01m de largo en la cara superior y talud de 2:1.
- g. La transición de salida resultado del cálculo tiene como resultado una longitud de 2.15m, el muero tendrá una altura de 1.10m incluyendo su borde libre por seguridad, su sección transversal pasará de una sección rectangular (dissipador de energía) a una sección trapezoidal (aguas abajo) manteniéndose un régimen subcrítico.

RECOMENDACIONES

- a. Para el diseño de una rápida se recomienda trabajar con transiciones simplificadas en línea recta, ya que así se puede evitar la formación de ondas que continuaran en el tramo inclinado.
- b. En una rápida las transiciones deben ser diseñadas con una sección trapezoidal debido a que proveen las pendientes necesarias para estabilidad y el tramo inclinado con una sección rectangular por ser una canal revestido alojado sobre una zona excavada.
- c. La sección de control debe estar dada por un vertedero, con cual se minimizará la posibilidad de separación entre la lámina de agua y el fondo de estructura.
- d. El tramo inclinado, la trayectoria y el dissipador de energía deben ser diseñados con la misma sección transversal (conservando el mismo ancho de solera) para evitar cambios sección (convergente o divergente) que puedan generar formación de ondas.
- e. La longitud inicial de la poza dissipadora (hallada en base a la longitud del resalto hidráulico) tal vez no contengan el resalto hidráulico que se genera por cual se recomienda agregar accesorios (dientes deflectores, dados y umbral de salida)

BIBLIOGRAFIA

- Arbulú, J. (23 de Agosto de 2012). *Libro de Obras Hidráulicas I*. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2012/08/23/descargar-libro-de-obras-hidraulicas-i/descargar-libro-de-obras-hidraulicas-i/>
- Autoridad Nacional del Agua. (01 de Diciembre de 2010). *Criterios de Diseños de Obras Hidráulicas para la Formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales y de Afianzamiento Hídrico*. Obtenido de <http://www.ana.gob.pe/media/389716/manual-dise%C3%B1os-1.pdf>
- Bureau of Reclamation. (1981). *Diseño de Presas Pequeñas*. Mexico: Editorial Continental.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá: McGraw Hill.
- Palomino, J. (14 de 07 de 2014). *Diseño hidráulico de una rápida para el proyecto : construcción del canal principal Fortaleza, distrito Congas, provincia Ocos, región Anchas*. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2014/07/14/manual-de-diseno-hidraulico-de-una-rapida/>
- Rodríguez, P. (15 de Mayo de 2016). *Hidráulica de Canales*. Obtenido de <http://ingenieria-unc.blogspot.pe/2010/08/hidraulica-de-canales-pedro-rodriguez.html>
- Rojas, H. (13 de Diciembre de 2013). *Estructuras Hidráulicas*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/81337373/Diseo-y-Aspectos-Constructivos-en-Obras-de-Arte>
- Villamarín, S. (15 de Enero de 2013). *Manual Básico de Diseño de Estructuras de Disipación de Energía Hidráulica*. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6181/1/T-ESPE-040211.pdf>
- Villón, M. (2005). *Diseño de Estructuras Hidráulicas*. Lima: Editorial Villón.
- Villón, M. (2007). *Hidráulica de Canales*. Lima : Editorial Villón.

ANEXOS

Tramos iniciales del Canal Julquillas-Pacar



Tramo del Canal Julquillas-Pacar aguas arriba



Desnivel a salvar en el Canal Julquillas-Pacar



Tramo del Canal Julquillas-Pacar aguas abajo